

Luiz Henrique Souza Mendonça

**PROPOSTA DE MODELO PARA CONTROLE DE  
TRANSPORTE PÚBLICO BASEADO EM ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do Grau  
de Mestre em Engenharia de Produção,  
Área de Concentração Logística e  
Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Enzo Morosini  
Frazzon

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Mendonça, Luiz Henrique Souza

Proposta de Modelo para Controle de  
Transporte Público Baseado em Análise de  
Confiabilidade / Luiz Henrique Souza

Mendonça ; orientador, Enzo Morosini Frazzon -  
Florianópolis, SC, 2016.

120 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal  
de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa  
de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de Produção. 2. Transporte  
Público. 3. Operações. 4. Controle Operacional.  
I. Frazzon, Enzo Morosini . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção. III.  
Título.

Luiz Henrique Souza Mendonça

**PROPOSTA DE MODELO PARA CONTROLE DE  
TRANSPORTE PÚBLICO BASEADO EM ANÁLISE DE  
CONFIABILIDADE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Transporte e Logística, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Florianópolis, 15 de Março de 2016.

---

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Werner Krauss Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho a minha mãe,  
meus irmãos e minha companheira.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao CNPq e ao governo federal pelo suporte a essa pesquisa. A Universidade Federal de Santa Catarina, que me proveu a base necessária para chegar a esta etapa e a oportunidade de dar seguimento ao meu desenvolvimento profissional e pessoal. Ao Departamento de Engenharia de Produção, que acreditou no meu potencial e me abriu as portas pela segunda vez. A meus professores, por seguirem compromissados com a formação de seus estudantes. Ao meu orientador por haver me guiado ao longo deste processo. A WPLEX, pela gentileza e disposição dispensados desde o princípio, e pelo fornecimento das informações utilizadas neste trabalho. Em particular, ao Fabio Engleitner, sempre cordial e prestativo nos diversos e-mails respondidos. A cidade de Florianópolis, companheira por mais de dez anos e primeiro laboratório de estudos em transporte público. Ao contribuinte brasileiro, que financiou esta pesquisa com seu trabalho. A minha família, pelo apoio incondicional sempre. E por fim, a minha companheira, amiga, terapeuta e consultora, minha pedra fundamental, Magali Natália Aloatti, pelo que passou e pelo que está por vir.





Uma cidade avançada não é aquela em que os pobres andam de carro, mas aquela em que os ricos utilizam transporte público.

(Enrique Peñalosa, 2013)



## RESUMO

Desde os primeiros estudos na área de transporte público a confiabilidade do sistema é reconhecida como um dos principais fatores que determinam a escolha modal, e se mantém ainda hoje como uma das mais importantes características do sistema. Diversas estratégias de controle operacional foram criadas ao longo dos anos com o intuito de aumentar a confiabilidade e manter um nível de serviço satisfatório, mas raros são os casos de sistemas de transporte público no Brasil que utilizem estas estratégias com foco na operação do sistema. Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da utilização de uma estratégia de reprogramação de veículos na confiabilidade de um sistema de transporte público através de um estudo de caso. Para tanto, analisa-se a operação de duas linhas de ônibus de um sistema de transporte público no estado de São Paulo, comparado a operação atual com o caso em que se aplica a estratégia de controle. A confiabilidade da operação foi usada como critério de comparação e foi possível demonstrar um incremento expressivo neste indicador com a utilização do controle operacional. Como resultado, este trabalho apresenta os benefícios da estratégia de controle analisada num caso específico e oferece um modelo que pode ser implementado de forma simples em sistemas de transporte de passageiros por ônibus.

**Palavras-chave:** Transporte Público. Controle operacional. Estudo de caso. Planejamento e Controle de Operações.



## **ABSTRACT**

Since the first studies on public transportation the reliability of the system is recognized as one of the main factors determining mode choice, and has maintained itself as one of the most important characteristics of the system up to this day. Various operational control strategies were created through the years with the objective of increasing reliability and maintaining a satisfactory level of service, but few are the cases of public transportation systems in Brazil in which these strategies are directed at the system's operation. This work has the objective of evaluating the impacts of the utilization of a rescheduling strategy on the reliability of a public transportation system by means of a case study. To accomplish that, the operation of two bus lines of a public transportation system in the state of São Paulo are analyzed, comparing the current operation with the case in which the control strategy is deployed. The reliability of the system is used as the comparison criterion and it was possible to demonstrate a significant increment on that indicator with the use of operational control. As a result, this work presents the benefits of the strategy analyzed in a specific case and offers a model that could be easily implemented in public transportation systems based on buses.

**Keywords:** Transit System. Operational Control. Case Study. Operations Planning and Control.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Relacionamento entre tarefas do TNP.....	32
<b>Figura 2</b> – Etapas do trabalho de pesquisa .....	47
<b>Figura 3</b> – Densidade de Probabilidade para viagens no período entre 7:15 – 7:50, Linha 2-1 .....	52
<b>Figura 4</b> – Distribuição cumulativa para o período entre 7:15 – 7:50, Linha 2-1 .....	52
<b>Figura 5</b> – Troca NN.....	63
<b>Figura 6</b> – Troca 2-3-1.....	65
<b>Figura 7</b> – Confiabilidade versus veículos no Terminal A.....	69
<b>Figura 8</b> – Confiabilidade versus veículos no Terminal B.....	69
<b>Figura 9</b> – Confiabilidade versus veículos no Terminal C.....	70
<b>Figura 10</b> – Modelo de revisão de literatura .....	85
<b>Figura 11</b> – Resultado das buscas em bases de dados .....	88
<b>Figura 12</b> – Gráfico de Pareto do processo de seleção de artigos. ....	89
<b>Figura 13</b> – Distribuição dos temas nos artigos selecionados. ....	90
<b>Figura 14</b> – Artigos selecionados por ano de publicação. ....	91
<b>Figura 15</b> – Função de Déficit para o terminal A utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia.....	103
<b>Figura 16</b> – Função de Déficit para o terminal B utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia.....	103
<b>Figura 17</b> – Função de Déficit para o terminal C utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia.....	105
<b>Figura 18</b> – Função de Déficit para o sistema utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia.....	105
<b>Figura 19</b> – Função de Déficit para o terminal A utilizando 80° percentis.....	107
<b>Figura 20</b> – Função de Déficit para o terminal B utilizando 80° percentis.....	107
<b>Figura 21</b> – Função de Déficit para o terminal C utilizando 80° percentis.....	109
<b>Figura 22</b> - Função de Déficit para o sistema utilizando 80° percentis.....	109





## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1</b> – Aplicações de APTS.....	44
<b>Quadro 2</b> – Banco de palavras-chave.....	86
<b>Quadro 3</b> – Distribuição dos artigos entre periódicos científicos.....	92



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Linhas Analisadas.....	49
<b>Tabela 2</b> – Bloco de viagens com início 12:15, Linha 1-1 .....	57
<b>Tabela 3</b> – Confiabilidade da operação controlada. ....	67
<b>Tabela 4</b> – Nova confiabilidade da operação controlada.....	68
<b>Tabela 5</b> – Confiabilidade da operação com a frota recomendada.....	71
<b>Tabela 6</b> – Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 1 .....	93
<b>Tabela 7</b> – Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2 .....	97
<b>Tabela 8</b> – Relatório de operação do dia 03/08/2015, Linha 2-2. ....	103
<b>Tabela 9</b> – Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade).....	111



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

APC	- Automatic Passenger Counting
APTS	- Advanced Public Transportation Systems
AVL	- Automatic Vehicle Location
AVM	- Automatic Vehicle Monitoring
CAD	- Computer-Assisted Dispatching
DAI	- Distributed Artificial Intelligence
DSS	- Decision Support System
FIFO	- First-In First-Out
FTA	- Federal Transit Administration
HPC	- Hybrid Predictive Control
ITS	- Intelligent Transportation Systems
LIFO	- Last-In First-Out
MAS	- Multi-Agent System
TNP	- Transit Network Problem
TP	- Transporte Público
TSP	- Traffic Signal Priority
TUC	- Traffic-Responsive Urban Control
USDOT	- United States Department of Transportation



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA ....	23
1.2	OBJETIVOS .....	26
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>26</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>26</b>
1.3	JUSTIFICATIVA.....	27
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
2.1	PLANEJAMENTO DE OPERAÇÕES EM TP.....	31
2.2	CONTROLE DA OPERAÇÃO .....	33
<b>2.2.1</b>	<b>Estratégias de Controle nas Estações .....</b>	<b>36</b>
2.2.1.1	Retenção Voltada a Redução de Tempos de Espera.....	36
2.2.1.2	Retenção Baseada em <i>Headway</i> .....	36
2.2.1.3	Estratégias de Omissão de Paradas.....	37
2.2.1.4	Estratégias de Retorno Antecipado, <i>Deadheading</i> e Reprogramação.....	38
<b>2.2.2</b>	<b>Estratégias de Controle entre Estações.....</b>	<b>40</b>
2.2.2.1	Controle de Velocidade .....	40
2.2.2.2	Prioridade Semafórica.....	41
2.3	TECNOLOGIAS DE SUPORTE EM TP.....	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>47</b>
3.1	PROCESSAMENTO DE DADOS .....	48
3.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	49
3.3	OPERAÇÃO ATUAL E CENÁRIO PROPOSTO .....	52
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>55</b>
4.1	CONFIABILIDADE E A OPERAÇÃO ATUAL.....	55
4.2	A ESTRATÉGIA DE REPROGRAMAÇÃO .....	58
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	66
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
5.1	RESULTADOS E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	73
5.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	76
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE A – O processo de revisão de literatura.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE B – Tabela de horários e blocos de viagem atuais .....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE C – Exemplo de relatório de operação .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE D – Funções de déficit (tabela da companhia).....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE E – Funções de déficit (80º percentis).....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE F – Programação com 27 veículos.....</b>	<b>111</b>





# 1 INTRODUÇÃO

Este documento relata o trabalho desenvolvido como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Nesta seção, realiza-se a introdução ao texto, inserindo o trabalho no contexto científico e descrevendo a problemática examinada. Primeiramente é feita uma breve descrição do tema e problema de pesquisa. Em seguida apresentam-se os objetivos geral e específicos do trabalho. Posteriormente, discorre-se acerca do estado da arte e marco teórico da pesquisa. Por fim, descreve-se a estrutura do trabalho e a organização de suas seções constitutivas.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA

O ônibus surgiu na cidade de Nantes, na França, em 1826. Muito diferente do veículo que pode ser visto atualmente nas ruas de incontáveis cidades ao redor do mundo, os primeiros ônibus eram parecidos às diligências: um vagão puxado por cavalos, com rodas de madeira cobertas por cintas de aço e com o assento do condutor acima da cabine dos passageiros (POST, 2007). Esses veículos marcaram o surgimento do transporte coletivo baseado numa tabela de horários e são os ancestrais de todos os modos de Transporte Público (doravante TP) que existem hoje. De fato, a palavra ônibus vem do Latim *omnibus*, que significa literalmente “para todos”. No entanto, fazer do TP um meio de locomoção para todos e utilizado pela maioria ainda é um desafio nas grandes cidades modernas.

Nas últimas décadas, a crescente degradação nas condições de tráfego nas grandes cidades e as externalidades causadas pelo automóvel motivaram o surgimento de um novo paradigma em urbanismo e engenharia de transporte. Diferentemente do modelo tradicional que se baseava em criar mais espaço para o automóvel, novos conceitos sugerem a antítese desta abordagem: a redução do espaço do automóvel e a ampliação do espaço exclusivo a pedestres, ciclistas e transporte coletivo. Neste contexto, o TP é um dos pilares do desenvolvimento urbano sustentável, e seu planejamento deve ser realizado em conjunto com o planejamento urbano. Contudo, a aplicação desses conceitos depende de uma migração considerável de usuários de automóvel para o TP, algo difícil de promover.

Tem-se então o maior *trade-off* da gestão<sup>1</sup> de TP, pois ao passo em que se pretende oferecer um alto nível de serviço para atrair os usuários não cativos, deseja-se reduzir os custos da operação, mantendo as tarifas num nível que possibilite o acesso dos grupos sociais de baixo ingresso. Adicionalmente, a administração pública deseja reduzir os subsídios e as concessionárias de transporte buscam aumentar os lucros. Percebe-se a complexidade inerente à gestão de TP, que procura oferecer um serviço com boa cobertura espacial e temporal, eficiente, regular e confiável, para atender usuários que possuem demandas diferentes.

Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para auxiliar os processos constituintes da gestão de TP. Isto se deu inicialmente na prática, com tarefas realizadas manualmente por operadores, e depois na academia, onde se desenvolveram procedimentos computacionais para a realização destas atividades. Para ilustrar, a companhia Egged, cooperativa de agências de TP de Israel, testava em 1980 um sistema computacional para realizar a programação de quatro mil ônibus que operavam em duas mil linhas, e que era executada então manualmente por sessenta operadores utilizando gráficos de Gantt (CEDER, 2007).

No que se refere ao controle da operação, Pick e Readman (1959), relatam já na década de 50, a presença de operadores de transporte público postados em pontos estratégicos de linhas de ônibus em Londres, que utilizavam telefones para comunicar as condições de tráfego e funcionamento do sistema a uma central de controle. Esses operadores indicavam quando um ônibus vazio devia ultrapassar um ônibus cheio, ou podiam até instruir um ônibus que estivesse prestes a entrar em uma região congestionada a fazer um retorno e seguir operando no trajeto de volta.

Na academia o interesse em transporte público cresceu por volta da década de 70, motivado principalmente pela crise do petróleo e intensificação dos problemas relacionados ao automóvel. A partir daí, novas estratégias operacionais foram criadas e um tratamento matemático formal foi dispensado às já existentes. Também ganharam atenção os procedimentos de planejamento estratégico, tático e operacional, que logo passaram a fazer parte de sistemas computacionais de auxílio à operação (*computer-aided systems*). Estas ferramentas computacionais hoje fazem parte da infraestrutura tecnológica básica de um TP de grande porte.

---

<sup>1</sup> Neste trabalho chamamos de gestão de TP o conjunto que engloba os processos de planejamento, operação e controle do sistema de transporte público.

No que se refere à tecnologia, a aplicação de controles operacionais também trouxe consigo a necessidade de melhores ferramentas de monitoramento. A primeira delas foram os sistemas automáticos de monitoramento de veículos (*Automatic Vehicle Monitoring - AVM*) que possibilitavam que operadores soubessem a localização exata dos ônibus dispersos pela cidade. Em seguida vieram os sistemas de contagem de passageiros (*Automatic Passenger Counting - APC*), e, logo depois, sistemas que integravam os dois. Nos EUA, a pesquisa em tecnologias aplicadas a transporte ganhou impulso na década de 90, com a iniciativa *Intelligent Transportation Systems (ITS)* lançada pelo Departamento de Transporte dos Estados Unidos (*USDOT*). O programa *Advanced Public Transportation Systems (APTS)* foi criado pela *Federal Transit Administration (FTA)* como parte dessa iniciativa. APTSs são sistemas que permitem a localização de veículos, contagem de passageiros, pagamento automatizado e informação ao usuário, além de aquisição extensiva de dados, monitoramento e controle em tempo-real (BOLDT, 2000).

No Brasil, alguns sistemas já fazem uso de tecnologias de monitoramento e coleta de dados, principalmente no que se refere às ferramentas de localização de veículos, entretanto, poucos são os sistemas que fazem uso destes recursos para a execução de controles que atuem diretamente na programação do sistema, de forma a corrigir desvios no planejamento. Na maioria dos casos o controle consiste basicamente em priorização semafórica, de forma a tentar prevenir a ocorrência de atrasos através do controle do fluxo de veículos na rede de transporte, como é o caso em São Paulo (HIDALGO, 2009) e Porto Alegre (LADEIRA; MICHEL; SENNA, 2011), entre outras cidades no Brasil. Contudo, uma vez que os atrasos ocorrem, nenhuma estratégia é utilizada para mitigar seus efeitos na programação planejada. Uma possível razão seria a falta de um modelo de controle que revisse a programação dos veículos e pudesse ser aplicado facilmente, requerendo pouca informação para sua execução.

Numa primeira consulta à literatura, o modelo de controle proposto por Furth e Nash (1985) se postula como um candidato interessante para a manutenção do nível de serviço do sistema diante dos atrasos aleatórios inerentes ao TP. Esta estratégia consiste na formação de um banco de veículos que opera num determinado terminal. A cada vez que um veículo chega ao terminal, ele passa a fazer parte deste banco, conformando uma fila em ordem de chegada. Quando um ônibus previamente programado para uma viagem irá se atrasar (o que pode ser constatado através de ferramentas de monitoramento), um veículo do banco é escolhido para

substituí-lo, impedindo que ocorra o atraso. Na prática, os operadores de transporte já realizam ações semelhantes, mas geralmente desprovidas de critérios pré-estabelecidos para a seleção de veículos, e acionadas uma vez que o atraso já ocorreu. Assim, a estratégia em questão representa uma alternativa para a garantia da pontualidade nos terminais e consequente aumento na confiabilidade do sistema.

Desta forma, torna-se pertinente indagar em relação aos benefícios que poderiam ser alcançados através da utilização deste tipo de estratégia num sistema de TP em um caso específico. Diante disto, este trabalho estrutura-se a partir da seguinte questão: *Qual seria o impacto da utilização de uma estratégia de controle que garantisse a saída pontual dos veículos na confiabilidade de um sistema de transporte público?*

Considerando o exposto, este trabalho propõe a utilização de um modelo de controle da programação que atua na manutenção da pontualidade das saídas nos terminais, garantida pelo uso de uma estratégia de reprogramação. Primeiramente é realizada uma revisão de literatura, que provê o suporte teórico para o estudo de caso. Em seguida, a programação atual de duas linhas de transporte no estado de São Paulo é analisada e comparada com o caso em que se utiliza o modelo selecionado no controle da operação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos da utilização de uma estratégia de reprogramação na confiabilidade de um sistema de transporte urbano de passageiros, através de um estudo de caso.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Propor uma estratégia de controle e reprogramação de veículos de transporte urbano de passageiros;
- Caracterizar empiricamente uma situação envolvendo a programação de veículos para viagens em um sistema de transporte urbano de passageiros;
- Analisar comparativamente a confiabilidade da situação atual e de um cenário hipotético com a aplicação da estratégia de controle e reprogramação proposta para o caso descrito.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo de TP é um campo significativamente vasto. Sua complexidade reside na diversidade das áreas de pesquisa pertinentes a esses sistemas, como planejamento de operações, economia e organização, tecnologias de transporte e de suporte, planejamento urbano e administração pública. O TP é determinante para a economia da cidade, ao definir as zonas que irão se desenvolver, os empregos que serão gerados, a produtividade dos trabalhadores, o acesso à saúde, educação, etc.

Quando de seu surgimento, o TP teve um impacto significativo na vida das pessoas nas metrópoles do Século XIX. Não obstante, algumas impressões da época já ditavam a tônica do que seria a visão das pessoas em relação ao TP pelos anos que viriam:

Como aconteceria novamente de tempos em tempos com os novos modos de transporte público, muitas pessoas pensavam que a vida era melhor graças ao *omnibus*, mas ninguém estava realmente satisfeito (POST, 2007, p. 15, tradução nossa).

Com a disseminação do automóvel, no início do Século XX, uma nova revolução se dá no transporte urbano, que, com o passar dos anos, direciona fortemente o investimento público para o transporte individual motorizado. Isto se dá principalmente nos EUA pós-guerra (fins da década de 40), onde a produção automobilística se multiplica, juntamente com as grandes obras de infraestrutura e o desenvolvimento de pesquisa científica na área de transporte.

Com a crise do petróleo, na década de 70, o interesse em TP reaparece e impulsiona a pesquisa científica, principalmente nos EUA. Surge, por primeira vez, o desejo de atrair o usuário do automóvel para o TP. O trecho seguinte é uma evidência histórica do fato:

Apesar das campanhas contra a poluição, uma “crise energética” [ênfase do autor], e outras publicidades contra o uso do automóvel e contra as empresas petrolíferas, houve, nos anos recentes, nenhum declínio óbvio no tráfego viário e pouco aumento no uso do transporte público. A construção de rodovias, contudo, foi largamente reduzida (o que contribuiu para o desemprego), e os temas populares entre estudantes de engenharia de transporte são “planejamento de transporte urbano”

ou projeto de sistemas de transporte público. Promover o tráfego viário é quase impatriótico (NEWELL, 1977, p. 647, tradução nossa).

Esses primeiros estudos em TP apontavam a confiabilidade como um dos fatores determinantes na escolha modal (TURNQUIST; BOWMAN, 1980) e vários artigos trabalharam o tema ao longo dos anos (ABKOWITZ; LEPOFSKY, 1990; ABKOWITZ; TOZZI, 1987; BOWMAN; TURNQUIST, 1981; CASELLO; NOUR; HELLINGA, 2010; DIAB; BADAMI; EL-GENEIDY, 2015; OORT, 2011; YAO et al., 2014; YU; YANG; LI, 2012). No caso do controle operacional, a confiabilidade é o principal critério utilizado para a avaliação de estratégias de controle.

A primeira estratégia de controle operacional (e ainda hoje a de maior destaque) foi o controle de retenção/despacho de veículos, introduzido em Newell (1971) e Osuna e Newell (1972). Outras estratégias destacadas são a omissão de paradas, o *deadheading* e a priorização semaforica, sobre as quais diversos trabalhos foram e seguem sendo publicados, conforme será discutido na revisão de literatura deste trabalho.

Nos anos 90, a disseminação dos sistemas ITS e APTS proveu operadores de ferramentas avançadas de monitoramento, que também ofereciam novas possibilidades para a execução de estratégias de controle. Entretanto, a utilização destas tecnologias num modelo integrado de controle da operação segue sendo um desafio. Nas palavras de Avishai Ceder:

O grande empecilho às ações de controle em tempo-real é a falta de modelagem prudente e software que possa ativar estas ações de modo automático/semi-automático/manual. (CEDER, 2007, p. 551, tradução nossa).

A estratégia de Furth e Nash(1985) representa uma possibilidade de emprego dos sistemas de localização de veículos, que poderiam ser utilizados para sinalizar com antecedência quando um ônibus irá se atrasar para a próxima viagem programada. Este modelo possui a vantagem de que, por haver sido elaborado numa época em que havia poucos recursos tecnológicos disponíveis, prescinde de qualquer informação demasiadamente sofisticada, podendo, inclusive, ser executado sem nenhum tipo de recurso tecnológico envolvido. Adicionalmente, é um modelo que previne ativamente os atrasos nas

saídas dos ônibus através da realocação de veículos. Esta é uma característica importante, pois muitas vezes os atrasos em viagens de ônibus são influenciados mais por atrasos na saída do terminal que por eventos decorrentes da operação. Essa é uma das conclusões do trabalho de Bly e Jackson (1974, p.1), que relatam que “[...] para a linha modelada em particular, benefícios muito maiores poderiam ser alcançados garantindo que os ônibus deixassem os terminais no horário exato de saída, sempre que possível”.

Este trabalho tenta investigar esta alternativa e seus impactos na operação, avaliando como sua utilização irá impactar a confiabilidade num caso específico. Esta pesquisa é relevante pois, considerando a lacuna identificada na literatura, avalia a utilização de uma estratégia de aplicação factível para a manutenção da confiabilidade em sistemas de TP. O estudo de caso foi feito com dados da operação real de um sistema de TP do estado de São Paulo. Estes dados foram submetidos a um tratamento estatístico que resultou na geração de curvas de distribuição de probabilidade para os tempos de viagem das linhas analisadas. Com isso, foi possível medir o desempenho do sistema atual utilizando o critério de confiabilidade proposto por Furth e Nash (op. cit.). Em preparação a utilização da estratégia, uma nova programação é gerada para o sistema utilizando o método da função de déficit (CEDER e STERN, 1981), baseada nos tempos de viagens provenientes da análise estatística. Por fim, mede-se um limite inferior para a confiabilidade desta operação e discute-se acerca dos efeitos da utilização da estratégia em questão.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em capítulos de acordo com a seguinte sequência:

- Capítulo 1 – Introdução: tem como objetivo a contextualização do trabalho com uma visão geral do tema, apresentação do problema de pesquisa, desenvolvimento dos objetivos geral e específicos, justificativa do trabalho e estrutura da dissertação.
- Capítulo 2 - Revisão de Literatura: tem como objetivo a revisão da literatura relacionada ao tema da pesquisa e construção do referencial teórico para o desenvolvimento do estudo de caso.
- Capítulo 3 - Metodologia: tem como objetivo apresentar o ferramental teórico e empírico utilizado no desenvolvimento do

trabalho, detalhando o processamento dos dados recebidos e a análise estatística realizada em preparação ao estudo de caso.

- Capítulo 4 - Estudo de caso: tem como objetivo o desenvolvimento do estudo de caso, comparando a confiabilidade da operação atual com a utilização do modelo proposto.

- Capítulo 5 - Conclusões: tem como objetivo apresentar as conclusões do trabalho, retomando os objetivos geral e específicos e discutindo como a pesquisa foi capaz de atendê-los. Também se discute acerca das limitações da pesquisa, contribuição científica e sugestões para futuros trabalhos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção faz-se a revisão de literatura dos trabalhos nas diversas áreas relacionadas ao tema desta pesquisa. O objetivo é a construção do referencial teórico que irá fornecer o embasamento para o desenvolvimento do estudo de caso. Adicionalmente, apresenta-se uma contextualização histórica, e é traçada a evolução das áreas de controle e planejamento em TP e tecnologias de suporte à operação, destacando as contribuições mais importantes. Primeiramente, o planejamento de operações em TP é revisto, seguido do controle de operações e das tecnologias de suporte. A metodologia utilizada para o processo de seleção e análise da bibliografia é descrito no Apêndice A deste trabalho.

### 2.1 PLANEJAMENTO DE OPERAÇÕES EM TP

Problemas de transporte são algumas das aplicações mais tradicionais de modelagem matemática e Pesquisa Operacional, com os primeiros modelos datando da década de 50. Entretanto, a pesquisa acadêmica esteve majoritariamente concentrada no tráfego rodoviário até meados da década de 70, quando o interesse foi direcionado para o TP (NEWELL, 1977). Nesse contexto os primeiros trabalhos abordavam as etapas tradicionais de planejamento e a criação de ferramentas que permitissem a automatização de tarefas como a programação de veículos e geração de escalas para os motoristas. Uma evidência da proliferação desses trabalhos foi o *Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services*, em 1975, na cidade de Chicago, que precedeu à implementação dos primeiros sistemas de programação de transporte assistida por computador, na Europa e América do Norte (DADUNA e WREN, 1988). Esse *workshop* posteriormente transformou-se em conferência internacional e deu origem à série “*Computer-Aided Transit Scheduling*”, que passou a reunir os trabalhos aí apresentados.

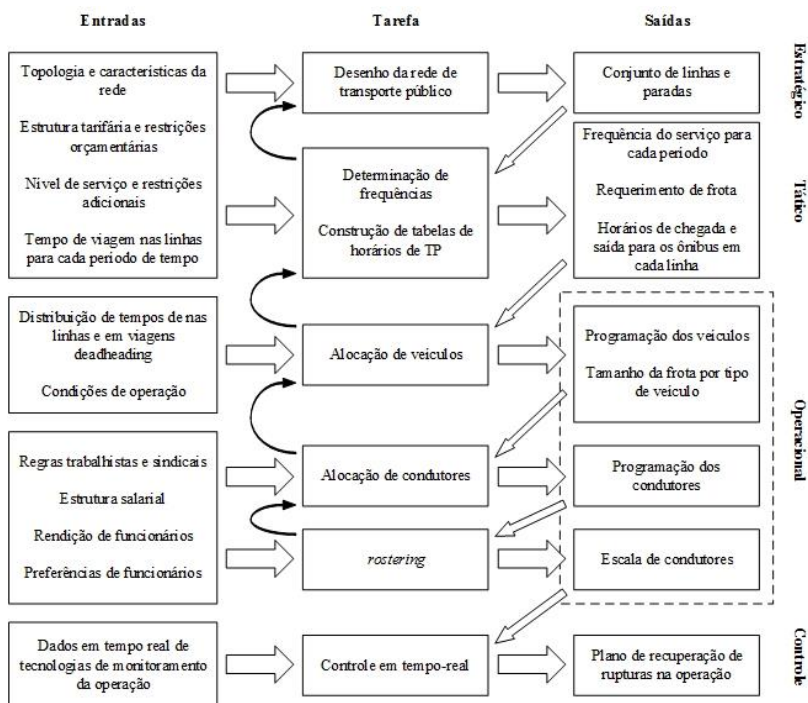
Tradicionalmente, o planejamento da operação de um TP é dividido em quatro etapas sequenciais (CEDER, 2007): i) planejamento de linhas e rede, ii) planejamento da tabela de horários, iii) alocação de veículos e iv) alocação de pessoal. Essas etapas compõem o Problema de Planejamento da Rede de Transporte Público (Transit Network Problem –TNP). As tarefas presentes no TNP também podem ser divididas segundo o nível de planejamento ao qual pertencem:

- estratégico: desenho da rede de transporte;

- tático: definição de frequências e tabelas de horários;
- operacional: alocação de veículos, alocação de condutores e geração de escalas (*rostering*).

A Figura 1 apresenta as tarefas comuns ao TNP, juntamente com as entradas necessárias e as saídas resultantes. Essas tarefas são geralmente realizadas em sequência, de forma iterativa, de modo que cada fase provê informações que serão utilizadas na fase seguinte, que por sua vez podem requerer a revisão da fase anterior, conforme ilustrado.

**Figura 1** – Relacionamento entre tarefas do TNP.



Fonte: adaptado de Ibarra-Rojas et al. (2015)

Devido à extensa quantidade de trabalhos encontrados para cada uma dessas atividades, nesta revisão de literatura indicam-se somente algumas publicações, suficientes para uma visão abrangente do processo e onde podem ser encontradas referências posteriores. Ceder (2007) realiza uma cobertura extensiva do processo de planejamento de TP,

oferecendo não somente uma abordagem analítica das atividades de planejamento, mas também uma discussão acerca das implicações práticas para operadores de TP. Vuchic (2005) trata do planejamento da operação e expande a análise sobre os aspectos econômicos do processo, como financiamento, tarifação e marketing, incluindo também a seleção de diferentes modais. Desaulniers e Hickman (2007) analisam algumas das tarefas de planejamento mencionadas acima a partir de um enfoque de Pesquisa Operacional. A evolução das técnicas e tecnologias relacionadas a TP pode ser acompanhada nas diferentes publicações da série *Computer-Aided Transit Scheduling* (DADUNA; BRANCO; PAIXÃO, 1995; DADUNA; WREN, 1988; DESROCHERS; ROUSSEAU, 1992; HICKMAN; MIRCHANDANI; VOSS, 2008; VOSS; DADUNA, 2001; WILSON, 1999). Uma revisão atual em planejamento e controle de operações em transporte público pode ser encontrada em Ibarra-Rojas et al.(2015).

## 2.2 CONTROLE DA OPERAÇÃO

No que se refere às estratégias de controle operacional os primeiros trabalhos foram publicados por Newell (1971) e Osuna e Newell (1972), e introduziram o problema da retenção e despacho (*holding/dispatching*) de veículos. No último, os autores apresentam o conflito entre a frequência e a regularidade do serviço, e formulam um modelo de controle de *headway* (distância medida no tempo entre um ônibus e seu antecessor) como um problema de programação dinâmica com o objetivo de reduzir o tempo médio de espera por passageiro. Apesar de apresentar um modelo simplificado, tratando de rotas com uma única parada (onde é realizado o controle) servidas por um ou dois veículos, o valor deste trabalho reside no tratamento matemático e contextualização do problema de controle dos horários programados, motivando diversos trabalhos posteriores (CEDER, 2007).

O problema da retenção, em termos gerais, consiste em decidir por quanto tempo reter um ônibus num ponto de controle pré-determinado e quando despachá-lo dali. A retenção/despacho utilizando uma parada controlada (*checkpoint control strategies*) é a estratégia de controle mais presente na literatura e possui papel central nesta revisão. Do ponto de vista operacional, esta estratégia é classificada em três categorias (VANDEBONA; RICHARDSON, 1986):

- a) Métodos baseados em quadro de horários (*timetables*);
- b) Métodos baseados no *headway*;

c) Métodos de resposta à demanda.

Na categoria (a) (também chamada de controle de pontualidade) a estratégia de controle é passiva e tenta-se aumentar a aderência à programação utilizando um quadro de horários numa parada controlada previamente estabelecida. Ali o veículo é retido até o horário de saída e, neste caso, pode-se fazer uso do histórico da operação para a determinação do quadro de horários no ponto de controle. Esta técnica é geralmente usada em linhas que operam com baixa frequência. A categoria (b) envolve controles ativos, pois regulam o tempo que separa dois ônibus (*headway*), com o objetivo de mantê-lo num nível previamente determinado. É o tipo de controle descrito por Osuna e Newell (1972), também chamado de controle de regularidade. Os métodos baseados em *headway* são úteis em linhas que operam com alta frequência. Na categoria (c) o controle regula os veículos segundo a demanda de passageiros prevalecente. O modelo analítico é baseado em Newell (1971) que estima o *headway* adequado dos despachos nos pontos de controle segundo as taxas de chegada de passageiros nas paradas. Este método é o mais difícil de ser implementado, pois prescinde do histórico de chegada de passageiros em cada ponto ao longo da rota.

Após Osuna e Newell (op. cit.), a retenção aparece em uma longa lista de trabalhos. Newell (1974) retoma o problema focando nos efeitos que causariam o *bunching*<sup>2</sup>. Barnett (1974) fornece um algoritmo para construção de uma estratégia ótima de despacho para uma rota com um único ponto de controle, de forma tal que o *headway* médio não seja alterado. Newell (1977) trata do caso de uma linha com várias paradas, avaliando o tempo de folga (*slack time*) que minimiza a probabilidade de que um ônibus se atrase em relação ao horário programado. Abkowitz, Eiger e Engelstein (1986) utilizam simulação para elaborar um modelo de variação de *headway* que é utilizado para derivar uma metodologia de controle por retenção. Vandebona e Richardson (1986) utilizam simulação para medir mudanças no nível de serviço e confiabilidade do sistema com a introdução de estratégias de controle baseadas em quadro de horários. Wirasinghe e Liu (1995) desenvolvem um modelo analítico para analisar o número e a localização de pontos de controle numa rota de

---

<sup>2</sup> O termo *bunching* refere-se à situação em que dois ônibus numa mesma linha se encontram em algum ponto do trajeto, geralmente com um ônibus cheio seguido por um ônibus vazio. Newell (1974) refere-se a esse fenômeno como *pairing* ou “pareamento” em tradução livre.

ônibus, bem como os tempos de folga adequados para a programação dos veículos.

Outras estratégias de controle aparecem de forma mais dispersa na literatura. Bly e Jackson (1974), num trabalho pioneiro, simulam diversas estratégias de controle, utilizando dados coletados da linha 9 da Bristol Omnibus Company, na cidade de Bristol, Inglaterra. Além dos controles já mencionados, os autores simulam a permissão de ultrapassagem entre ônibus (chamada aqui de *PASSING control*, também conhecida como *leapfrogging*), adição de veículos reservas (*INJECTION control*), substituição de veículos (*LATEBUS control*), omissão de paradas (*SKIP control*, também chamado de *skip-stop* ou *expressing* na literatura), restrição de parada (*MTBUS control*) e retorno antecipado (*TURN control*, também conhecido como *short-turning*). Curiosamente, os autores chegam à conclusão de que, para a linha analisada, o ganho com a utilização de controle na operação é pequeno e, inclusive, se houvessem melhorias em relação à pontualidade no terminal, os controles propostos seriam completamente dispensáveis. Os autores atribuem isso às características da linha analisada e argumentam que os controles poderiam ser mais eficientes se aplicados a uma linha mais frequente e congestionada. Dando continuidade, Jackson (1977) então simula a operação da linha 11 da London Transport, desta vez analisando quatro tipos diferentes de estratégias de controle: três de retenção/despacho por ajuste de tempo de folga nos horários programados e uma de retorno antecipado. Essa linha percorria aproximadamente 16 km na cidade de Londres, com *headway* entre 3 e 4 minutos nos horários de pico. Foi percebida uma redução de até 20% no tempo médio de espera dos passageiros (aproximadamente 1,2 minutos) com o uso das estratégias de retenção.

Ibarra-Rojas et al. (2015) classifica as estratégias de controle operacional em dois grupos:

- 1) Estratégias de controle *nas* estações: retenção/despacho, omissão de paradas, restrição de embarque<sup>3</sup>, retorno antecipado, *deadheading* e reprogramação<sup>4</sup>;

---

<sup>3</sup> Esta estratégia surge posteriormente na literatura, e trata de restringir o embarque de passageiros mesmo quando o ônibus não atingiu sua capacidade máxima, com o intuito de minimizar o tempo de espera total.

<sup>4</sup> Ibarra-Rojas et al.(2015) inclui as estratégias de retorno antecipado, *deadheading* e reprogramação na seção de planejamento da operação, como estratégias de suporte para a manutenção da programação dos veículos.

- 2) Estratégias de controle *entre* estações: controle de velocidade e prioridade semafórica.

### 2.2.1 Estratégias de Controle nas Estações

#### 2.2.1.1 Retenção Voltada a Redução de Tempos de Espera

Das referências mais recentes, um trabalho inovador é desenvolvido por Zhao, Bukkapatnam e Dessouky (2003), que propõem o uso de Inteligência Artificial Distribuída (*Distributed Artificial Intelligence* - DAI) para o controle automático da operação. Os autores elaboram um modelo de retenção que busca minimizar a espera total de passageiros, com o uso de uma arquitetura distribuída num Sistema Multi-Agente (*Multi-Agent System* - MAS), em que a execução da estratégia é resultante da negociação entre agentes (veículos e paradas).

Zolfaghari, Azizi e Jaber (2004) formulam um modelo de retenção que considera a capacidade do veículo, minimizando o tempo de espera dos usuários nas paradas, tanto dos que conseguem embarcar, quanto dos que vão ser obrigados a esperar pelo próximo veículo devido à restrição de capacidade. Delgado, Munoz e Giesen (2012) testam a combinação entre retenção e restrição de embarque, considerando os tempos de espera de usuários na parada, tempos de espera de passageiros embarcados devido a retenção do veículo, e o tempo extra de espera devido a capacidade do veículo ou a aplicação da restrição de embarque.

Alguns trabalhos tratam do uso da retenção para minimizar os tempos de espera de passageiros que realizam conexões. Hall, Dessouky e Lu (2001) determinam tempos de retenção ótimos em terminais de integração em condições estocásticas. O sistema é testado utilizando dados da Metropolitan Transportation Agency, na cidade de Los Angeles. Dessouky et al. (2003) avaliam a retenção em terminais de integração, comparando estratégias que dependem de tecnologia (comunicação, rastreamento e contagem de passageiros) com estratégias que requerem somente informação local.

#### 2.2.1.2 Retenção Baseada em *Headway*

Um dos trabalhos precursores em retenção baseada em headway é desenvolvido por Abkowitz e Lepofsky (1990), que testam o impacto desta estratégia na confiabilidade de algumas das linhas operadas pela Massachusetts Bay Transportation Authority. Os autores destacam a obtenção de reduções de custo significativas devido à redução do

requerimento de frota. Daganzo (2009) apresenta um modelo de controle baseado em *headway* que determina dinamicamente o tempo de retenção baseado em informação em tempo-real. Xuan, Argote e Daganzo (2011) consideram a disponibilidade da informação em relação ao veículo anterior para o controle do *headway* numa parada controlada. Os autores desenvolvem um modelo simples, baseado numa programação virtual, e demonstram que este é capaz de prover soluções quase-ótimas.

Bartholdi e Eisenstein (2012) sugerem a não utilização de programação ou *headway* pré-definido. Os autores propõem um esquema em que os *headways* se auto-equalizam dinamicamente e o que eles chamam de “*headway* natural” do sistema surge espontaneamente. No caso de distúrbios, os *headways* se re-equalizam sem que o condutor se dê conta, ou que o controle da operação intervenha. Em dois trabalhos correlatos, Cats et al. (2011, 2012) utilizam simulação (através do simulador BusMezzo) para avaliar o impacto da utilização de diferentes estratégias de retenção no desempenho de uma linha de ônibus de alta frequência na cidade de Estocolmo, Suécia. Além dos tempos de espera dos passageiros, os autores analisam as implicações para os operadores do sistema, avaliando os impactos no gerenciamento da frota e gestão de pessoal.

### 2.2.1.3 Estratégias de Omissão de Paradas

A omissão de paradas em tempo-real é o tema do trabalho de Sun e Hickman (2005). Neste trabalho, os autores formulam a estratégia como um problema de programação inteira não-linear, supondo tempos de embarque e desembarque como variáveis aleatórias. Neste caso, os tempos de embarque são modelados por uma distribuição de Poisson e os tempos de desembarque por uma distribuição binomial. Duas estratégias de omissão de paradas são testadas e comparadas, de modo que num dos casos permite-se que os ônibus parem em segmentos omitidos (em caso de desembarque). Sidi et al. (2008) apresentam um sistema de suporte a decisão (*Decision Support System – DSS*) que utiliza um modelo híbrido (lógica difusa e algoritmos evolutivos) para a regulação em tempo-real de sistemas de TP. Estratégias de omissão de paradas são utilizadas numa otimização multi-objetivo para determinar novas estruturas para as linhas de ônibus no caso de grandes rupturas na operação.

Um modelo de controle preditivo híbrido (*Hybrid Predictive Control – HPC*) é proposto por Cortés et al. (2010) e Sáez et al. (2012), utilizando estratégias de omissão de paradas e retenção de forma conjunta. O modelo utiliza um algoritmo genético para resolver o

problema dinâmico multi-objetivo de redução do tempo de espera e do impacto da aplicação das estratégias. Muñoz et al. (2013) comparam o desempenho de diversas estratégias de controle dinâmico em tempo-real baseadas em *headway*. Os autores utilizam duas abordagens distintas: otimização determinística com horizonte rolante de longo prazo e controle preditivo híbrido considerando horizontes de tempo curtos e evolução estocástica do sistema. Estas abordagens são testadas em oito cenários distintos para uma mesma linha de ônibus, demonstrando que a abordagem determinística obtém melhor desempenho nos casos em que a capacidade do veículo é a restrição limitante (*binding constraint*).

#### 2.2.1.4 Estratégias de Retorno Antecipado, *Deadheading* e Reprogramação

As estratégias de *deadheading* tratam de viagens nas quais os ônibus devem deslocar-se do ponto de término da última viagem até o ponto de início da próxima viagem operando fora de serviço (não transportam passageiros). No caso do retorno antecipado, o veículo opera até um determinado trecho da linha e volta na direção do ponto de início da operação. São estratégias intimamente relacionadas, pois ambas tratam da segmentação de uma rota numa linha de ônibus para oferecer capacidade extra em trechos de maior demanda. Em termos simples, enquanto no retorno antecipado o ônibus opera *até* um determinado trecho, no *deadheading* ele opera *a partir* de um determinado trecho.

O *deadheading* também pode ser utilizado como suporte à manutenção da tabela de horários, utilizando um veículo que terminou uma viagem num determinado terminal para iniciar outra viagem noutro terminal (o que geralmente é evitado na alocação dos veículos). Desta forma, diminui-se o requerimento de frota através do incremento da utilização de veículos. Neste caso, a estratégia de *deadheading* funciona como um controle da programação de viagens através da redistribuição espacial dos veículos disponíveis. Da mesma forma, as estratégias de reprogramação atuam no reajuste da alocação de veículos, no caso em que desvios aleatórios na operação impedem que um ônibus que estava programado para uma determinada viagem chegue a tempo de realizá-la.

Os primeiros trabalhos em retorno antecipado tratavam da determinação de linhas específicas para determinadas zonas, utilizando programação dinâmica para determinar o número de zonas, os pontos de início e fim das linhas, e o número de veículos por zona (FURTH, 1986; JORDAN; TURNQUIST, 1979). Delle Site e Filippi (1998) analisam viagens com retorno antecipado, determinando o número de paradas, a



tarifação (no caso de sistemas de tarifação por distância percorrida), tamanho de veículos e frequências. Os autores minimizam os custos dos passageiros e operadores de transporte em termos de tempos de espera, tamanho de frota, distâncias percorridas, etc.

Ceder e Stern (1981) oferecem um método gráfico de programação de veículos utilizando funções de déficit, que inclui viagens *deadheading*. Os autores apresentam o método como uma alternativa aos métodos numéricos exatos de alocação de veículos utilizando programação matemática, permitindo neste caso sua utilização por operadores, que teriam uma ferramenta visual para o controle da operação. Eberlein Et Al. (1998) apresentam o *deadheading* como estratégia de controle em tempo-real, determinando quais veículos executam a operação e a partir de quais paradas estes devem operar. Vale notar que, neste caso, a estratégia de *deadheading* é muito semelhante a estratégia de omissão de paradas, com a distinção de que, na última, as paradas podem ser omitidas em qualquer ponto da rota. Isto faz do *deadheading* um caso especial de omissão de paradas, como pode ser visto em Liu et al. (2013). Yu; Yang e Li (2012) utilizam uma estratégia de *deadheading* para manutenção da confiabilidade em trechos de pico em linhas de ônibus. Cortés, Jara-Díaz e Tirachini (2011) integram as estratégias de *deadheading* e retorno antecipado num único modelo, com o objetivo de definir rotas que possam satisfazer a demanda de maneira eficiente, reduzindo os custos de usuário e operadores. Os autores demonstram que a abordagem se justifica em alguns casos, quando desequilíbrios na ocupação são percebidos em diferentes segmentos na mesma rota, ou diferentes sentidos no mesmo segmento.

A estratégia de reprogramação (Vehicle Re-Scheduling Problem) consiste em redefinir a alocação de veículos no caso de rupturas graves na operação (quebra de veículo, acidentes de trânsito, emergências médicas, obras na pista, etc.), com a finalidade de minimizar os impactos na programação inicial. A abordagem de otimização consiste em minimizar os custos quando ocorrem desvios consideráveis, ou mudanças na tabela de horários. É um tópico relativamente recente, abordado em poucos trabalhos. Li, Mirchandani e Borenstein (2007, 2009) apresentam modelagem e algoritmos para o problema de reprogramação num único terminal, e posteriormente reformulam o modelo, o que resulta num problema *NP-hard*, para o qual os autores propõem uma heurística lagrangeana. Uma revisão de literatura é oferecida por Visentini et al.(2014), numa perspectiva mais abrangente, incluindo sistemas de transporte ferroviários e aeroviários.

O trabalho de Furth e Nash (1986) trata da estratégia de *vehicle pooling*, que consiste em manter um “banco” de veículos no terminal sem programação pré-estabelecida. Os veículos são despachados do terminal segundo uma regra FIFO, de forma que o primeiro veículo a chegar deve ser o primeiro a ser despachado. Isto possibilita também o entrelaçamento das linhas (*interlining*), ou seja, permitir que um ônibus possa operar em diferentes linhas. O procedimento desenvolvido para o cálculo da confiabilidade é então aplicado em oito linhas que partem de um mesmo terminal na cidade de Boston e demonstra-se que a estratégia não só melhora a aderência à programação, como possibilita uma redução de 11% na frota. Apesar de não ser uma estratégia de reprogramação *per se*, esta estratégia pode funcionar como tal, na medida em que, diante da impossibilidade de que um ônibus cumpra a programação pré-estabelecida, os mesmos critérios podem ser utilizados para a escolha do veículo que fará a viagem em seu lugar.

## 2.2.2 Estratégias de Controle entre Estações

As estratégias de controle entre estações são executadas ao longo do trajeto numa determinada linha, através da priorização dos ônibus em cruzamentos sinalizados, ou instruções de níveis de velocidade que são passadas aos condutores durante a operação. O controle de velocidade aparece como uma alternativa à retenção de veículos, uma vez que os passageiros que se encontram dentro do veículo terão uma percepção diferente em relação ao tempo de espera se o veículo se encontra em movimento.

### 2.2.2.1 Controle de Velocidade

Chandrasekar, Long Cheu e Chin (2002) testam um controle envolvendo prioridade semaforica, retenção e controles de velocidade através de simulação, utilizando o simulador PARAMICS. Os autores avaliam a aderência a programação e a regularidade nos *headways* para definir o espaçamento entre ônibus nas mesmas linhas e demonstram que nos casos de linhas de alta frequência (*headways* entre 5 e 10 minutos) 80% dos casos apresentam redução de mais de 10% no excesso de tempo de espera, e em 60% dos casos consegue-se uma redução de até 20% nesta medida. Daganzo e Pilachowski (2011) propõem um esquema de cooperação entre ônibus em situações de desvio na operação planejada, através da redução de velocidade dos ônibus que encontram-se a frente quando o *headway* entre este veículo e o anterior torna-se muito alto. Os

autores argumentam que a estratégia provê *headways* regulares com maiores velocidades de operação que os métodos de controle tradicionais.

#### 2.2.2.2 Prioridade Semafórica

O controle de prioridade semafórica (*Traffic Signal Priority – TSP*) consiste na regulação de fase de semáforos, priorizando o fluxo de pessoas ao invés do fluxo de veículos. É um problema complexo, pois deve levar em conta a configuração de toda a rede de transporte ao beneficiar um conjunto de arcos determinados. A estratégia “[...] depende de três elementos principais: i) estimativa de atraso; ii) ponderação (geralmente baseada no número de passageiros nos veículos); e iii) o problema de otimização que define os semáforos (IBARRA-ROJAS et al., 2015, p. 68).

Senevirante (1990) utiliza um modelo de simulação de Monte Carlo para analisar o impacto de diferentes estratégias operacionais considerando, pela primeira vez, estratégias de prioridade semafórica (*bus priority*). Na mesma linha, Bell (1992) tratava das possibilidades de controle semafórico que surgiam com novas tecnologias. De fato, a prioridade semafórica é um subproblema do controle semafórico, que tem como objetivo melhorar a performance da rede de transporte urbana como um todo. Como exemplo, Kraus et al. (2010) descrevem a aplicação da estratégia TUC (*Traffic-responsive Urban Control*) na cidade de Macaé, no estado do Rio de Janeiro.

Yang e Luo (2013) apresentam um modelo de controle semafórico acíclico em tempo-real, considerando prioridade de TP. Os autores utilizam um modelo composto por um módulo de otimização de sinal baseado em algoritmo genético e um módulo de simulação microscópica de tráfego. He, Head e Ding (2014) apresentam um modelo de controle semafórico que atua na coordenação de cruzamentos sinalizados, ao mesmo tempo em que considera prioridade multi-modal (ônibus, veículos de emergência, caminhões comerciais e pedestres). A priorização é feita sob requisição dos veículos elegíveis, e está baseada num modelo de programação inteira mista baseada em requisição.

### 2.3 TECNOLOGIAS DE SUPORTE EM TP

O congestionamento nas ruas de Londres foi a motivação para o primeiro sistema de monitoramento de veículos. Desenvolvido por Pick e Readman (1959), o *Bus Electronic Scanning Indicator* (BESI) era composto por placas de identificação anexadas aos veículos, que eram

lidas por unidades de *scanner* localizadas em *totens* nas laterais das ruas e enviadas a uma central de controle por radio frequência, onde havia um gabinete central de recepção e apresentação. O trabalho que descreve o desenvolvimento do aparato é de destacada relevância histórica, sobretudo pela contextualização do problema que motivou a pesquisa. Os autores relatam que o aparato foi encomendado pelo departamento de transporte de Londres como suporte a operadores do sistema de transporte da cidade (que contava então com 7000 ônibus operando em 500 linhas) com o intuito de melhorar o monitoramento e facilitar a implementação de alguns controles operacionais que já eram executados na época. A primeira versão do BESI foi instalada em Londres em 1959. Na década de 70, diversos outros sistemas já funcionavam nas ruas de Londres, Hamburgo, Chicago e Bristol (BLY; JACKSON, 1974). Imagens do BESI e seus subcomponentes, bem como uma breve explicação de seu funcionamento podem ser vistas em London Transport Museum (2014).

Também na década de 70, diversas empresas iniciaram programas de teste de sistemas de contagem de passageiros, chamados de *Automatic Passenger Counting* (APC), com o intuito de facilitar a aquisição de informação sobre perfil de ocupação de veículos ao longo das linhas, antes realizadas manualmente (para métodos tradicionais de coleta de dados em transporte público, ver Ceder (2007) e Vuchic (2005)). Na década seguinte, ao menos trinta agências de transporte nos EUA e Canadá haviam implementado ou estavam implementando este tipo de sistema. Diferentemente do AVM, os primeiros APCs eram sistemas *off-line*, cujos dados coletados eram processados depois da operação, ou seja, eram sistemas de suporte ao planejamento e gestão que não contribuíam para o controle operacional. Estes eram compostos de sensores de contagem (tapetes eletrônicos ou sensores infravermelho nos primeiros sistemas), microprocessadores embarcados, um componente de hardware para armazenamento de dados, um componente de transferência de dados e um CPU estacionário com software de processamento. Logo surgiram sistemas integrados que anexavam informações de localização e rodagem (provenientes de AVMs) aos dados coletados pelos APCs.

Em pouco tempo o desafio passou a ser a integração das tecnologias que vinham surgindo (DADUNA, 1992). Também é interessante notar que os primeiros sistemas eram voltados exclusivamente ao gerenciamento e controle do transporte, sem qualquer tipo de benefício direto ao usuário (exceto, evidentemente, um melhor funcionamento do sistema). É Osuna (1985) quem, pela primeira vez, aborda a questão do custo psicológico da espera do passageiro e provê a justificativa teórica para o desenvolvimento de sistemas de informação ao

passageiro em tempo-real. Outro desenvolvimento importante são os sistemas de controle semafórico, que, desde o início, já previam a aplicação na gestão do transporte público, através da priorização de tráfego (BELL, 1992).

Em 1991, a pedido do Congresso Estadunidense, o Departamento de Transporte dos Estados Unidos (USDOT), juntamente com a *Intelligent Transportation Society of America*, iniciou um projeto de desenvolvimento de uma arquitetura ITS que fosse compatível com a tecnologia de transporte utilizada no país. Esse projeto foi concluído em 1996 e teve como resultado a National ITS Architecture, um conjunto de padrões que passou a servir como referência no desenvolvimento de tecnologias com o objetivo de obter um sistema compatível em todo o país, que conectasse todos os modos de transporte. No mesmo ano, o USDOT começou uma iniciativa que tinha por objetivo implantar a infraestrutura ITS em todo o país, ao longo de dez anos. A *Federal Transit Administration* (FTA) criou o programa em *Advanced Public Transportation Systems* como parte dessa iniciativa (BOLDT, 2000). Em 1998, o USDOT publicou o primeiro de uma série de relatórios que descreviam o estado da arte no desenvolvimento deste programa (VOLPE NATIONAL TRANSPORTATION SYSTEMS CENTER, 1998). O relatório está dividido em quatro partes: gerenciamento de frota, informação ao usuário, pagamento eletrônico de tarifa e gerenciamento de demanda por transporte. Os principais componentes constantes nos relatórios do USDOT são agrupados no Quadro 1, de acordo com a categoria de cada sistema.

Diversos artigos tratam de tecnologias APTS propondo novos componentes de aquisição de dados, avaliando impactos da utilização desses sistemas ou sugerindo diferentes tipos de informação passíveis de serem obtidas através de APTS. Hickman e Wilson (1995) avaliam as implicações da informação ao passageiro em tempo-real nos tempos de viagem e escolha de rotas. Chen et al. (2004) utilizam dados de APC para realizar previsões de horários de chegada de ônibus. D'Acerno, Carteni e Montella (2009) utilizam AVL para estimar condições de tráfego urbano. Cortés et al. (2011) analisam as velocidades de ônibus utilizando dados de monitoramento por GPS. Barabino, Di Francesco e Mozzoni (2013, 2014) fazem um diagnóstico da regularidade a partir de dados brutos de AVL e posteriormente oferecem um modelo de processamento de dados brutos de APC. Chen e Dongyuan (2013) utilizam dados de APTS para obter uma das informações mais valiosas e difíceis de se obter no planejamento de STP: a matriz de origem-destino (matriz O/D) dos usuários, neste caso, os que utilizam *smart-cards*.

**Quadro 1** – Aplicações de APTS

<b>Aplicação de APTS</b>	<b>Sistema</b>	<b>Características</b>
Sistemas de monitoramento	AVL	Determinação automática de posição por meio de reconhecimento embarcado (odômetro e bússola), GPS, totens (que transmitem sinais que são captados pelo veículo), rádio terrestre, e relato instantâneo.
	APC	Contagem automática de ascenso e descenso de passageiros
	Advanced communication	Rádio digital (informação binária) e/ou rádio truncado (seleção de frequência por computador).
	CAD	Software de despacho como ferramenta de suporte.
	Operações automatizadas de software	Software que exibe posição do veículo, dados do veículo e da empresa, e informação de comunicação.
	Alarme silencioso	Sinal de emergência acionado pelo motorista, possível microfone para operadores, câmera de vigilância <i>onboard</i> .
	Monitoramento de componentes de veículo	Medição remota automática de óleo de motor, temperatura do motor, sistemas elétricos, pressão dos pneus, etc.

Fonte: Adaptado de Ceder (2007)

**Quadro 1 (cont.) - Aplicações de APTS**

<b>Aplicação de APTS</b>	<b>Sistema</b>	<b>Características</b>
Sistemas de bilhetagem automatizado	AFP	Pagamento por smart card, cartão magnético, cartão de crédito/débito, etc.
	Tarifação integrada	Esquema de tarifação com cobertura para diversas empresas.
Sistemas de informação ao passageiro	ATIS	Informação ao passageiro em tempo-real, pré-embarque, no terminal, e em trânsito.
	Informação multi-modal	Informação ao passageiro cobrindo múltiplos modos.
Sistemas variados de informação	Sonda veicular	Aquisição automática de dados de veículos de transporte público para estimativas de tempos de percurso, velocidades e fluxos no tráfego urbano.
	Terminal de dados móvel	Dispositivos wireless para transmissão e recebimento de informações.
	Compartilhamento de informação	Compartilhamento de informações entre empresas de transporte a respeito de tráfego e incidentes
	Gerenciador de mobilidade	Coordenação de requerimentos de viagem e despacho de veículos entre empresas.
Controle semafórico	Priorização manual	Extensão de fase verde - ativada pelo motorista.
	Priorização automática	Extensão automática de fase verde

Fonte: Adaptado de Ceder(2007).

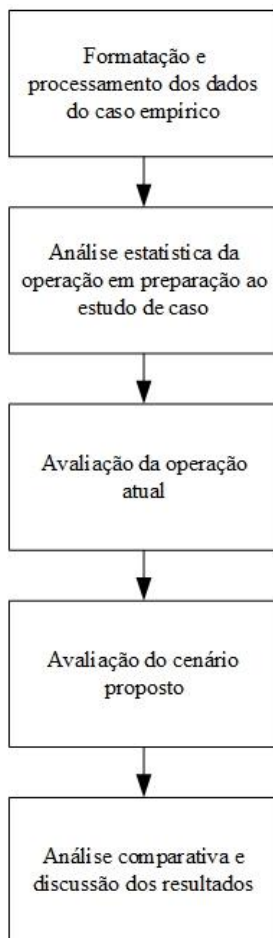




### 3 METODOLOGIA

O trabalho aqui proposto é essencialmente empírico, pois testa um modelo de controle da programação em sistemas de transporte público através de um estudo de caso, comparando analiticamente o desempenho da operação atual com a operação controlada através do modelo proposto. As atividades realizadas para o alcance dos objetivos deste trabalho são exibidas na Figura 2.

**Figura 2** – Etapas do trabalho de pesquisa



Fonte: desenvolvido pelo autor.

O objetivo desta seção é apresentar o ferramental teórico e empírico deste trabalho, discutindo os procedimentos executados em preparação a e no desenvolvimento do estudo de caso realizado. São detalhados os dados utilizados (procedência, limitações e tratamento) e o modo como estes são utilizados como entrada na execução da análise proposta. Paralelamente, são mencionados aqui os elementos presentes na análise que são característicos de um estudo de caso (limites, detalhes, aprofundamento e restrições) e necessários para a reprodução e apreciação do trabalho, no escopo de um estudo científico.

### 3.1 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados utilizados consistem na programação e relatórios da operação de duas linhas de ônibus de um sistema de transporte público. Toda a informação foi provida pela WPLEX software, empresa que desenvolve sistemas de gestão operacional para empresas e sistemas de transporte de passageiros por ônibus, localizada na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. A companhia responsável e o local de operação são confidenciais e revela-se apenas que o sistema opera numa cidade do estado de São Paulo. Os relatórios detalham, para cada dia de operação, quais ônibus estavam programados para cada viagem, os horários de saída programados, os horários de saída realizados, os horários de chegada previstos e os horários de chegada realizados. Os relatórios de operação referem-se ao período entre Julho e Dezembro de 2015.

Diversos problemas foram encontrados na informação disponibilizada. Com relação ao formato, os dados foram disponibilizados em rtf (Rich Text Format) e tiveram que ser convertidos para um formato que permitisse a utilização de planilhas para análise. Em relação ao conteúdo, diversas viagens apresentavam duração zero, algumas viagens foram programadas e não realizadas, diversas viagens apresentavam tempos absurdos (podendo chegar a 22 horas de viagem) e algumas viagens constavam do quadro de horários, mas não possuíam sequer um registro no período, entre alguns dos problemas mais comuns. Segundo a WPLEX, existem uma variedade de causas possíveis para estes problemas, como falhas no equipamento de rastreamento, erro de alocação de frota no rastreador ou no *back office*, viagem que foi programada e não ocorreu, erro no cadastro de cerca eletrônica dos terminais, etc.

O tratamento dos dados consistiu primeiramente na organização dos dados numa planilha, utilizando o software Excel. Para isso, foi desenvolvido um método de conversão do formato .rtf para o formato .xls, possibilitando a utilização das ferramentas de análise do software em questão. A planilha resultante ordena a informação utilizando colunas para linha, sentido, data, veículo, saída programada, saída registrada, chegada prevista, chegada registrada e tempo de viagem (em minutos). Desta forma torna-se possível o estudo detalhado da operação atual do sistema, sendo possível verificar, por exemplo, o número médio de veículos utilizados em cada linha, os tempos médios de cada viagem (em cada horário, linha e sentido), a frequência de atrasos nas saídas, o impacto dos atrasos nas viagens posteriores, etc.

Para fins de simplificação da análise, o estudo desenvolvido foi focado na operação em dias úteis das linhas analisadas. No restante deste trabalho, se irá referir a estas linhas por Linha 1 e Linha 2. Os três terminais utilizados na operação são chamados de Terminal A, B e C. As viagens receberam códigos de quatro dígitos, em que um prefixo de dois dígitos representa a linha e sentido da viagem, e os dois dígitos finais representam sua ordem na sequência de saídas do terminal. Por exemplo, refere-se à quarta viagem realizada na Linha 2, na direção 1, por viagem 2104. A Tabela 1 exibe a informação geral para todas as viagens realizadas em cada linha e sentido.

**Tabela 1-** Linhas Analisadas

<b>Linha</b>	<b>Direção</b>	<b>Prefixo</b>	<b>Terminal de Origem</b>	<b>Terminal de Destino</b>	<b>Número de viagens</b>
1	1	11	B	C	52
-	2	12	C	B	55
2	1	21	A	C	77
-	2	22	C	A	87

Fonte: desenvolvido pelo autor.

### 3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O estudo de caso proposto está baseado na análise probabilística dos tempos de duração das viagens realizadas. Para isso foi necessária uma análise estatística para a geração de curvas de distribuição de probabilidade dos tempos de viagem das saídas de veículos programadas

nas diferentes linhas, em ambos os sentidos. Esta análise consistiu na conformação de amostras destes tempos de viagem, permitindo o ajuste dos dados a uma função de distribuição de probabilidade conhecida (no caso, a função Lognormal, conforme detalhado adiante).

O primeiro problema encontrado, conforme mencionado anteriormente, foi a escassez de registros para alguns horários de viagem na programação das linhas analisadas. Pelos motivos já expostos, em alguns casos não foi possível reunir registros suficientes para a conformação de amostras representativas. Para contornar este problema, foram conformadas amostras para diferentes períodos do dia (em cada linha e sentido), ao invés de se ter uma amostra para cada horário de saída específico. A composição de cada período foi feita pelo agrupamento de viagens cujas saídas estão programadas para horários próximos entre si na tabela de horários. Como critério para a formação destes períodos foi utilizada a média aritmética dos tempos de viagem dos diferentes horários de saída, de forma que as viagens que possuíam uma duração média aproximada foram agrupadas nos mesmos períodos. Isto quer dizer que se uma viagem possuía saída programada para, por exemplo, 14:30 e outra viagem para 14:45, os tempos de viagem destas duas viagens conformariam uma amostra para o período de 14:30 a 14:45, contanto que as médias aritméticas dos tempos médios destas viagens estivessem dentro de uma margem de 5 minutos de diferença.

A partir das amostras geradas para cada período foi realizado o ajuste dos dados à função de distribuição Lognormal com três parâmetros, utilizando o software Easyfit®, de Mathwave Technologies. Este tipo de distribuição “distorcida” é comumente utilizada para a representação de tempos de viagem em segmentos de linhas de ônibus, pois representa a condição encontrada na prática de que os motoristas são geralmente incentivados a manterem-se próximos, mas nunca a frente dos tempos programados para um determinado itinerário (DESSOUKY et al., 2003).

Se uma variável aleatória  $X$  é lognormalmente distribuída,  $Y = \ln(X - \gamma)$  possui distribuição normal, com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . O terceiro parâmetro,  $\gamma$ , é dito parâmetro de localização, e desloca o valor mínimo da variável aleatória para a direita. Em termos práticos,  $\gamma$  representa um valor mínimo possível para a variável aleatória, como, por exemplo, um tempo mínimo de percurso no qual um veículo poderia realizar uma viagem. Desta forma, a variável aleatória está restrita ao domínio  $\gamma \leq X \leq +\infty$ . A função de densidade de probabilidade é dada por

$$f(X; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{(X - \gamma)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(X - \gamma) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

em que  $0 \leq \gamma \leq X$ ,  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$ . No caso em que  $\gamma = 0$ , tem-se a distribuição Lognormal com dois parâmetros. A função de distribuição cumulativa é dada por

$$F(X) = \Phi \left( \frac{\ln(X - \gamma) - \mu}{\sigma} \right) = \phi(x') \quad (2)$$

que pode ser calculada através da relação

$$\phi(x') = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{-x'}{\sqrt{2}} \right) \quad (3)$$

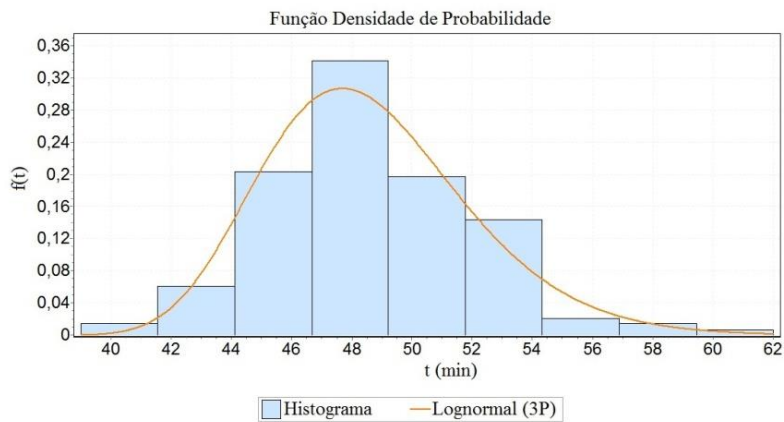
onde  $\operatorname{erfc}(x)$  é a função complementar da Função Erro de Gauss.

Um total de 115 curvas de distribuição de probabilidade foram ajustadas para os diferentes períodos, nas diferentes linhas e sentidos. O parâmetro  $\gamma$  para todas as curvas de uma determinada linha foi definido como o menor tempo de viagem encontrado na linha<sup>5</sup>, e os outros parâmetros foram ajustados através do software mencionado. A decisão de arbitrar um valor para o parâmetro  $\gamma$  foi tomada com o intuito de forçar um valor com implicação prática ao ajuste feito pelo software, e facilitar os cálculos realizados em planilha. A Figura 3 mostra a função de densidade de probabilidade ajustada para as viagens que saem no período entre 7:15 e 7:50, na Linha 2, direção 1, que inclui as saídas programadas para 7:15, 7:25, 7:35 e 7:45. A Figura 4 exibe a função de distribuição cumulativa para o mesmo período. Os parâmetros para esta curva são  $\sigma = 0,18487$ ,  $\mu = 2,9071$  e  $\gamma = 30$  minutos.

---

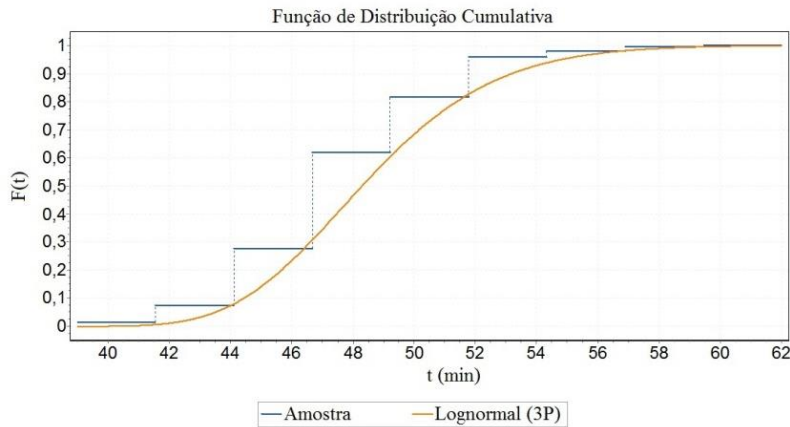
<sup>5</sup> Esses tempos eram muito similares entre os diferentes sentidos na mesma linha.

**Figura 3** - Densidade de Probabilidade para viagens no período entre 7:15 – 7:50, Linha 2-1



Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Figura 4**- Distribuição cumulativa para o período entre 7:15 – 7:50, Linha 2-1



Fonte: desenvolvido pelo autor.

### 3.3 OPERAÇÃO ATUAL E CENÁRIO PROPOSTO

A determinação das curvas de distribuição de probabilidade para as viagens permitiu o desenvolvimento do estudo de caso proposto. Este consiste na avaliação da operação atual do sistema e do cenário que envolve a aplicação da estratégia de controle selecionada. O critério

utilizado para esta avaliação é a confiabilidade da operação, conforme definido por Furth e Nash (1985). Este conceito se baseia na programação dos veículos, utilizando a distribuição de probabilidade dos tempos de viagem para avaliar as chances de que ocorram atrasos nas saídas dos terminais, considerando as sequências de viagens programadas.

A operação atual é avaliada segundo os blocos de viagens (viagens que um veículo deve fazer em sequência) utilizados pela companhia nas linhas analisadas. Assim, a confiabilidade da operação se baseia na probabilidade de que um veículo possa terminar uma viagem a tempo de começar a próxima no horário previsto. A análise é feita utilizando a programação fornecida pela WPLEX numa planilha Excel, permitindo o cálculo das probabilidades envolvidas a partir dos parâmetros da função Lognormal (incluída nas funções disponíveis no software) definida na análise estatística da operação, para cada período.

O cenário alternativo para a operação das linhas analisadas envolve a aplicação da estratégia de controle da programação. O modelo é baseado na proposta de Furth e Nash (op. cit.) e fundamenta-se na definição de um “banco de veículos” para um dado terminal. Estes veículos passariam a operar segundo uma regra FIFO<sup>6</sup>, formando uma fila no terminal, cujo último elemento seria aquele veículo que por último chegou, e cujo primeiro elemento deve ser sempre o primeiro a ser despachado na próxima viagem da tabela de horários. Esta estratégia garante a saída pontual dos veículos, pois, no caso em que um veículo se atrase para a próxima viagem que deveria fazer, é feita uma reprogramação, ou seja, é aplicado o controle sobre a operação. Neste caso, o primeiro veículo da fila (banco de veículos) é selecionado para fazer a viagem em seu lugar. Isto só não ocorrerá se não houver veículos no terminal, o que implica que, quanto maior a frota no banco de veículos, maior a confiabilidade da operação.

No estudo de caso, a estratégia descrita é modificada, de forma que o banco de veículos não é exclusivo a nenhum terminal em particular. Os veículos irão operar entre os três diferentes terminais, mas obedecendo à regra FIFO a cada chegada, em cada terminal. Este cenário é modelado

---

<sup>6</sup> Acrônimo em inglês para a expressão *first-in-first-out*, que se refere à estratégia geralmente utilizada em gerenciamento de estoque, representando a situação em que o primeiro item a entrar no estoque deve ser o primeiro a sair. Neste trabalho também é utilizado o acrônimo LIFO – *last-in-first-out* – que, similarmente, representa a situação na qual o último item a entrar no estoque deve ser o primeiro item a sair.

através da construção de uma *programação base* elaborada a partir da regra descrita. Esta programação é construída através do software Excel, permitindo o cálculo das probabilidades relacionadas às chegadas dos veículos nos horários programados para cada viagem da tabela de horários. Desta forma, também é possível calcular as probabilidades relacionadas à aplicação do controle da operação (reprogramação de veículos) no caso de atrasos em viagens específicas. Isto resulta numa planilha, da qual é possível extrair a probabilidade de que a programação seja cumprida com ou sem a execução da estratégia de controle. Desta forma é possível avaliar a confiabilidade do cenário proposto e compará-lo com a operação atual.

Uma descrição detalhada da operação atual e sua avaliação é oferecida na seção seguinte, que descreve o estudo de caso. Também é detalhado o cenário em que a estratégia de controle é aplicada e a forma como a confiabilidade é calculada neste caso. A última parte do estudo de caso apresenta os resultados e discute as implicações práticas da utilização da estratégia descrita num sistema de TP. Informações complementares relacionadas ao estudo de caso podem ser encontradas nos apêndices deste trabalho. O Apêndice B exibe a tabela de horários e os blocos de viagem das duas linhas analisadas no estudo de caso. O Apêndice C apresenta um exemplo de relatório de operação: o relatório da operação da Linha 2, no sentido 2, no dia 03 de agosto de 2015. No apêndice D encontram-se os gráficos das funções de déficit da programação primária feita para os veículos das Linhas 1 e 2 utilizando as estimativas de tempos de viagem dos operadores da companhia. Os novos gráficos das funções de déficit elaboradas a partir dos 80º percentis das curvas de distribuição de probabilidade dos tempos de viagem constam do Apêndice E. Por fim, os blocos de viagem para a operação com 27 veículos são exibidos no Apêndice F, com as confiabilidades de cada viagem e a confiabilidade da operação sem a aplicação de controles.



## 4 ESTUDO DE CASO

Nesta seção é apresentado o estudo de caso desenvolvido neste trabalho. O estudo está focado na operação de duas linhas de transporte público (Linhas 1 e 2) que operam entre três terminais (terminais A, B e C), e tem como objetivo demonstrar como a execução de uma estratégia de controle operacional simples impactaria o nível de serviço do sistema em questão. Isto é realizado através da comparação da operação atual do sistema de transporte analisado com a operação que seria alcançada com a implementação da estratégia proposta. Esta comparação é feita de forma analítica, utilizando o critério da confiabilidade do sistema. O restante da seção irá primeiramente trabalhar o conceito de confiabilidade e, a partir daí, desenvolver a análise da operação atual. Em seguida, descreve-se um cenário hipotético no qual a estratégia de controle é utilizada e como esta altera o desempenho do sistema. Por fim, apresentam-se os resultados juntamente com uma discussão acerca das implicações práticas da implantação da estratégia selecionada.

### 4.1 CONFIABILIDADE E A OPERAÇÃO ATUAL

O conceito de confiabilidade utilizado neste trabalho foi proposto por Furth e Nash (1985), que definem a confiabilidade de uma viagem como a probabilidade de que sua saída do terminal possa ser realizada pontualmente. Em outras palavras, se uma viagem  $i$ , que pertence a um bloco de viagens realizadas por um único veículo, tem sua saída programada para o horário  $D_i$ , e a viagem anterior feita pelo mesmo veículo tem chegada prevista para  $A_i = P_i + t_i$ , em que  $P_i$  e  $t_i$  são respectivamente o horário de saída e o tempo de viagem da viagem anterior, pode-se expressar a confiabilidade da viagem  $i$  como  $r_i = P(A_i \leq D_i)$ . Considerando que o tempo de viagem é independente entre diferentes viagens<sup>7</sup>, a confiabilidade para todo o sistema envolve a probabilidade de que todas as  $m$  viagens programadas saiam pontualmente (que a programação seja cumprida), ou seja:

---

<sup>7</sup> “É de se esperar que haja correlação entre os tempos de percurso de viagens numa mesma linha em caso de grandes distúrbios ao longo do trajeto, como o fechamento de uma via ou acidente de trânsito. Entretanto, em condições normais de operação, os atrasos aleatórios causados pela demanda e flutuações de tráfego apresentam menor dependência entre viagens, tanto em linhas distintas como na mesma linha” (FURTH e NASH, 1985, p. 271, tradução nossa).

$$R_0 = P[(A_1 \leq D_1) \cap (A_2 \leq D_2) \cap \dots \cap (A_m \leq D_m)] \quad (4)$$

em que pressupõe-se que a viagem predecessora  $A_i$  saiu no horário programado. Essa medida pode ser expressa matematicamente como

$$R_0 = \prod_{i=1}^m r_i \quad (5)$$

Deve-se notar que esta é uma medida severa para o desempenho do sistema, pois qualquer atraso, em qualquer uma das viagens, representa o não cumprimento da programação. Por exemplo, se cada uma das 271 viagens programadas para as duas linhas analisadas tivessem 99% de confiabilidade, a confiabilidade total do sistema seria  $0,99^{271} = 6,56\%$ . Por outro lado, a vantagem desta medida é expressar de forma exata a chance de que *todas* as viagens cumpram o planejamento.

A confiabilidade da operação atual é calculada com base na programação dos veículos (os blocos de viagens) atualmente utilizada pela concessionária. Esta programação é gerada pelo software WPLEX-ON e utiliza como entrada as previsões para os tempos de viagem das viagens programadas. Cada bloco de viagens é realizado, a princípio, por um veículo específico. Na prática, os veículos às vezes operam em mais de um bloco de viagens, geralmente um bloco no período da manhã e outro no período da tarde. Caso ocorra algum incidente que force o controle da operação a modificar a programação, um novo veículo pode assumir o bloco de viagens do veículo atrasado, causando uma cadeia de alterações na programação. Em condições normais, a alocação padrão das viagens estabelece um único “dono” (veículo) para cada bloco de viagens. A Tabela 2 traz a cadeia de viagens cuja primeira viagem está programada para 12:15 na Linha 1, no sentido 1.

**Tabela 2** - Bloco de viagens com início 12:15, Linha 1-1

<b>Código</b>	<b>Saída Programada</b>	<b>Chegada Prevista</b>	<b>Tempo Previsto (h:min)</b>
1122	12:15	13:38	01:23
1229	13:45	15:09	01:24
1130	15:25	16:48	01:23
1237	16:50	18:14	01:24
1141	18:25	19:48	01:23
1247	19:50	21:14	01:24

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Segundo informação da WPLEX, as previsões para o tempo de viagem são fornecidas pela companhia com base na experiência dos operadores. A partir desta informação, a programação é feita utilizando uma regra LIFO para a construção dos blocos de viagens. Estes são fatores determinantes para a confiabilidade da operação, pois acabam por resultar em pouco tempo de folga entre viagens. Isso significa que, uma vez que um ônibus se atrasa, é provável que este atraso se agrave ao longo das viagens restantes no bloco. De fato, os maiores atrasos verificados nos relatórios da operação parecem estar relacionados a este efeito. Observando a Tabela 2, é possível notar, por exemplo, que a viagem 1247 deve sair do Terminal C às 19:50, quando a chegada para o ônibus que realiza esta viagem está prevista para 19:48. Com base na curva de distribuição de probabilidade ajustada para esse período, a chance de que isso aconteça é de 75,3% (que é a própria confiabilidade da viagem 1247).

Outra consequência importante da forma como são construídos os blocos é que empregando uma estratégia LIFO, a quantidade de viagens de alguns blocos é aumentada em detrimento de outros. Em outras palavras, como os veículos que saem devem ser os últimos que chegaram, os últimos blocos construídos irão conter as poucas viagens que sobraram. De fato, na programação recebida, enquanto alguns blocos possuem até 8 viagens, existem outros que possuem uma única viagem e é possível verificar que, em alguns casos, os veículos designados a estes blocos realmente fazem uma única viagem diária. No sistema atual, as Linhas 1 e 2 possuem, respectivamente, 25 e 29 blocos de viagens. Estes números representam, a princípio, a quantidade de veículos necessários para levar a cabo a operação em cada linha. Na prática, alguns veículos operam em

mais de um bloco ao longo do dia, de forma que, no período analisado, as Linhas 1 e 2 operaram com médias de 18 e 17 veículos, respectivamente. Deve-se notar que existem implicações práticas que justificam o uso da regra LIFO, sobretudo no que diz respeito à fase posterior à alocação de veículos (alocação de condutores e *rostering*), conforme discutido ao final deste capítulo.

Para o cálculo da confiabilidade do sistema, supõe-se que todas as viagens de cada bloco são realizadas por um único veículo, e cada veículo opera em somente um bloco. Desta forma, a primeira viagem de cada bloco terá confiabilidade  $r_i = 1$ . Isto implica que a confiabilidade calculada para a operação atual é um limite superior da confiabilidade, pois eventualmente podem acontecer atrasos nas primeiras viagens dos blocos (como se pôde constatar nos relatórios de operação). Adicionalmente, como os blocos são gerados para cada linha separadamente (os blocos não contêm viagens de linhas distintas), é relevante o cálculo da confiabilidade de cada linha. Este pode ser obtido através da expressão

$$R_{0L} = \prod_{i=1}^v r_{Li} \quad (6)$$

em que  $r_{Li}$  é a confiabilidade da viagem  $i$ , contida no conjunto das  $v$  viagens feitas na linha  $L$ .

## 4.2 A ESTRATÉGIA DE REPROGRAMAÇÃO

A estratégia de controle operacional utilizada na análise é baseada em Furth e Nash (op. cit.). A ideia original consiste na utilização de um banco de veículos<sup>8</sup> no terminal e está baseada na ideia de que todos os veículos que operam num dado terminal (conformando um banco de veículos) são coletivamente responsáveis por todas as viagens que saem dali. Isto significa que nenhum veículo é previamente alocado a uma viagem ou bloco de viagens. Ao invés disso, um despachante é responsável por selecionar e despachar um veículo a cada vez que chega a hora de saída de uma determinada linha no terminal. Como descrito pelos autores, esta estratégia apresenta principalmente dois benefícios,

---

<sup>8</sup> Utiliza-se o termo “banco de veículos” como tradução para o termo “*pool of vehicles*” utilizado pelos autores, do qual deriva o nome da estratégia, a saber, *vehicle pooling*.

chamados de benefício do entrelaçamento (*interlining*) e benefício da troca (*swapping*).

O entrelaçamento refere-se à utilização de um mesmo veículo para a operação em diferentes linhas. Conforme descrito pelos autores, isto permite a redução da frota mínima necessária e da folga entre viagens na programação. O benefício do entrelaçamento utilizando-se um banco de veículos refere-se ao fato de que a utilização dessa estratégia já provê o entrelaçamento de forma inerente, de modo que a aplicação de padrões complexos de entrelaçamento num bloco de viagens é feita intrinsecamente, independentemente do algoritmo de programação das viagens.

O benefício da troca está relacionado ao fato de que ao permitir-se que um veículo “cubra” a viagem do outro, a utilização de um banco de veículos aumenta diretamente a probabilidade de que todas as saídas sejam realizadas pontualmente. Os autores utilizam como exemplo o par de viagens 1 e 2, que estão programadas para os horários  $D_1$  e  $D_2$ , partindo do mesmo terminal. Num sistema convencional, cada uma destas viagens teria um “dono” específico, ou seja, um veículo previamente alocado. Neste caso, a confiabilidade de um sistema composto somente destas duas viagens poderia ser expressa por

$$R_0 = P(A_1 \leq D_1)P(A_2 \leq D_2) \quad (7)$$

A confiabilidade do sistema supondo que os dois veículos conformem um banco de veículos agrega a probabilidade de que o veículo 1 chegue tarde para realizar a viagem 1, mas a tempo de realizar a viagem 2, ao mesmo tempo em que o veículo 2 chega a tempo de realizar a viagem 1. Isso pode ser expresso por

$$R_{\text{banco}} = P(A_1 \leq D_1)P(A_2 \leq D_2) + P(A_2 \leq D_1)P(D_1 \leq A_1 \leq D_2) \quad (8)$$

O segundo termo na equação 8 representa o ganho em confiabilidade com a utilização do banco de veículos. É importante notar que o critério de confiabilidade elaborado pelos autores está intimamente relacionado a esta estratégia. Conforme já mencionado, para o cálculo da confiabilidade de uma viagem específica, considera-se que a saída do veículo na viagem anterior foi pontual. Essa garantia é dada pela estratégia de reprogramação, pois quando o despachante percebe que o veículo que deveria fazer uma determinada viagem não se encontra no

terminal, outro veículo é despachado em seu lugar. Se não houver outro veículo, tem-se o caso em que a programação não pode ser cumprida.

É interessante notar que, apesar da estratégia descrita ter sido formulada há mais de trinta anos, as tecnologias disponíveis hoje proporcionam diversas maneiras de implementá-la de forma automática. O próprio despachante pode ser um software, ou um operador numa central de controle, disparando as viagens através de comandos aos veículo, ou diretamente aos condutores. Para a avaliação da estratégia, primeiramente constrói-se uma programação base a partir dos dados históricos da operação (se disponíveis), a qual são feitas modificações a cada vez que o sistema reconhece que um veículo não chegará a tempo para uma determinada viagem. Se esses atrasos são reconhecidos com antecedência durante uma viagem (através de monitoramento *online*), as modificações na programação podem ser disparadas imediatamente. Alternativamente, as modificações na programação podem ser disparadas pela chegada de uma janela de tempo anterior ao horário programado para as saídas. Como exemplo, pode-se pensar no caso em que a alteração na programação é realizada sempre que um veículo que deva realizar uma viagem não se encontre no terminal quando faltem menos de cinco minutos para sua saída.

Voltando ao cálculo da confiabilidade, a utilização da estratégia de reprogramação representa novas formas pelas quais a programação poderia ser cumprida. Neste caso, se um veículo está atrasado para a próxima viagem, qualquer outro veículo que tenha a chegada esperada (ou prevista) ou já esteja estacionado no terminal poderia ser escolhido em seu lugar, de forma a cumprir a programação. Isto agrega uma complexidade significativa para o cálculo da confiabilidade. Para ilustrar, se considerássemos que cada uma das 271 viagens nesta análise possuísse quatro precedentes possíveis (veículos provenientes de outras viagens que poderiam estar disponíveis para uma viagem em particular) existirão  $4^{271}$  maneiras pelas quais a programação pode ser cumprida. Por este motivo, a confiabilidade calculada é um limite inferior, referente à soma de parcelas associadas a alguns casos específicos de maneiras adicionais de manter-se a programação. Em outras palavras, ao invés de se calcular todas as formas possíveis de manter-se a programação, calculam-se somente as formas que possuem maior probabilidade de acontecer. Isto é feito a partir da utilização de categorias de manutenção da programação (i.e. as formas mencionadas), estabelecidas de forma hierárquica. Neste estudo de caso, utilizamos somente as categorias que representam contribuições significativa para a confiabilidade, de acordo com o estudo previamente citado (FURTH; NASH, op. cit.).

A primeira categoria de manutenção da programação proposta pelos autores mencionados é uma *programação base*, ou seja, o primeiro passo para o cálculo da confiabilidade da operação controlada é a elaboração de uma nova programação para o sistema e o cálculo da confiabilidade da mesma. Esta é construída com base nos 80º percentis das curvas de distribuição de probabilidade ajustadas para os diferentes horários de operação em cada linha e sentido. Neste trabalho, a construção da programação base é feita utilizando o método da função de déficit, devido a sua fácil aplicação e correspondência gráfica. Este método foi apresentado por Ceder e Stern (1981), e consiste na construção de uma função degrau (chamada função de déficit) para cada terminal. A função de déficit retorna o número de veículos necessários num terminal até um dado momento, tendo como argumento os horários do dia e como imagem o conjunto dos números inteiros. O cálculo é feito a partir da soma de todos os veículos que deixaram o terminal, subtraído da soma de todos os veículos que chegaram ao terminal até (e incluindo) aquele momento. O valor máximo da função representa o número mínimo de veículos necessários para levar a cabo a operação naquele terminal.

Estes veículos conformam o banco de veículos do terminal, e irão começar o período de operação no terminal, ou partirem da garagem nos horários adequados, conforme pode ser verificado nos gráficos das funções de déficit. Aqui destacamos uma divergência deste trabalho em relação a Furth e Nash (op. cit.). Neste estudo de caso, como se tratam de linhas que operam entre diferentes terminais, o banco de veículos de um dado terminal representa somente os veículos que irão *começar* a operação naquele terminal, podendo acontecer de um veículo passar por todos os três terminais ao longo do dia.

Com a determinação da frota em cada terminal, a programação é feita utilizando-se a regra FIFO. Na prática, isso implica que um veículo que chega a um terminal só vai sair quando todos os veículos que começaram o período de operação ali, ou chegaram antes do veículo em questão, houverem partido. Segue daí que a cada vez que se adiciona um veículo ao banco de veículos de um dado terminal, a confiabilidade da operação é aumentada para aquele terminal. Desta forma, pode-se calcular a confiabilidade de um terminal específico utilizando-se a expressão

$$R_s = \prod_{i=1}^n r_{si} \quad (9)$$

em que  $r_{si}$  representa a confiabilidade de uma viagem  $i$ , das  $n$  viagens que saem do terminal  $s$ . A confiabilidade da programação base é calculada da mesma forma, chamada agora de  $R_{base}$ , e equivale ao produto das confiabilidades de cada terminal. Todas as outras categorias de manutenção da programação são derivadas de alterações na programação base.

É importante destacar que, segundo os autores citados, a aplicação da estratégia em questão prescinde de uma programação pré-estabelecida. A construção de uma programação base neste caso serve somente de referência para a avaliação da confiabilidade. Contudo, pode ser o caso que a inexistência por completo de uma programação pré-estabelecida encontrasse resistência por parte de operadores de transporte, ou fosse de encontro a alguma regra trabalhista local. Neste caso, a programação base poderia ser usada pela companhia, em conjunto aos métodos de realocação aqui descritos.

A segunda categoria de manutenção da programação é a troca do vizinho mais próximo (*nearest neighbor* – NN – *swap*). Neste caso, a programação base não pode ser cumprida, exceto no caso em que o ônibus que estava designado para a viagem  $k$  (ônibus  $k$ ) na programação seja realocado a viagem  $k + 1$ . Ao mesmo tempo, o ônibus que deveria fazer a viagem  $k + 1$  (ônibus  $k + 1$ ) deverá agora fazer a viagem  $k$ . É o caso em que uma única realocação seria suficiente para cumprir a programação. A Figura 5 ilustra esta situação. A probabilidade deste evento é dada por

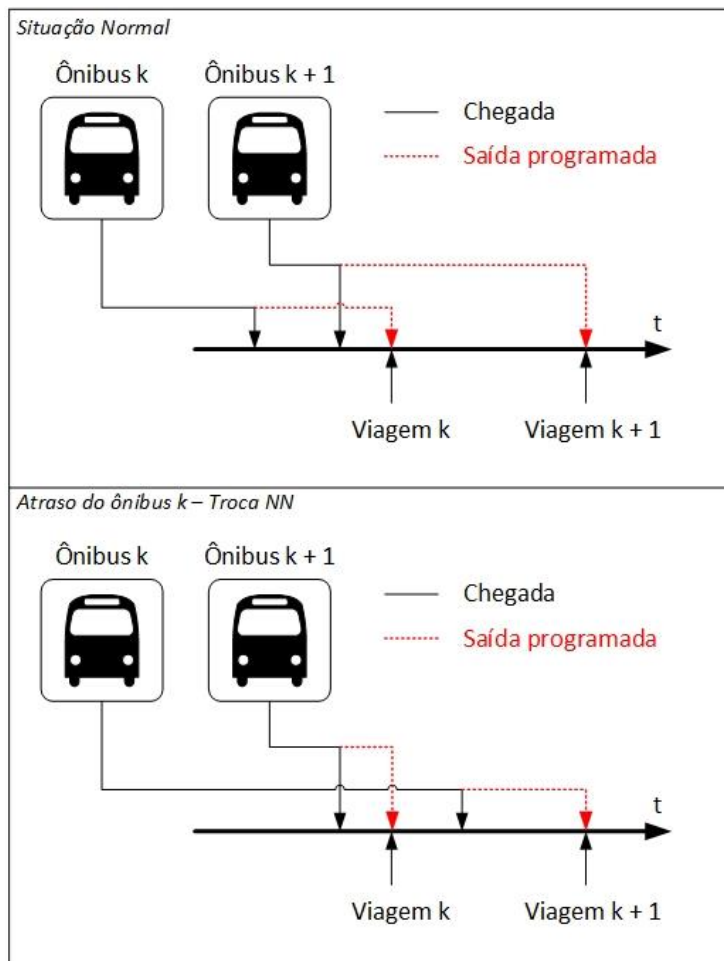
$$P_{NNk} = \frac{P(A_{k+1} \leq D_k)P(D_k < A_k \leq D_{k+1})R_{base}}{r_k r_{k+1}} \quad (10)$$

A contribuição para a confiabilidade de todos os eventos do tipo NN é dada por

$$R_{NN} = \sum_{k=1}^{m-1} P_{NNk} \quad (11)$$



**Figura 5 – Troca NN.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

A terceira categoria de manutenção da programação é o caso em que duas trocas NN são necessárias para que a programação seja cumprida. Desta forma, um par de viagens,  $j$  e  $j + 1$ , faz uma troca NN, e um segundo par distinto,  $k$  e  $k + 1$ , fazem outra troca NN. A probabilidade de um evento deste tipo é

$$P_{NNjk} = \frac{P_{NNj}P_{NNk}}{R_{base}} \quad (12)$$

E a soma das probabilidades para todos os eventos desse tipo é

$$R_{2NN} = \sum_{j=1}^{m-3} \sum_{k=j+2}^{m-1} P_{NNjk} \quad (13)$$

O último termo considerado no cálculo da confiabilidade (quarta categoria) é a troca 2-3-1. Neste caso, exemplificamos fazendo  $k = 1$ . Desta forma, se o ônibus 1 chega tarde para as viagens 1 e 2, mas a tempo para a viagem 3, enquanto o ônibus 2 chega a tempo para a viagem 1 e o ônibus 3 a tempo para a viagem 2, uma troca 2-3-1 pode ocorrer. Neste caso, o ônibus 2 faz a viagem 1, o ônibus 3 faz a viagem 2 e o ônibus 1 faz a viagem 3, tornando possível a saída pontual de todas as viagens. A probabilidade de um evento deste tipo é dada por

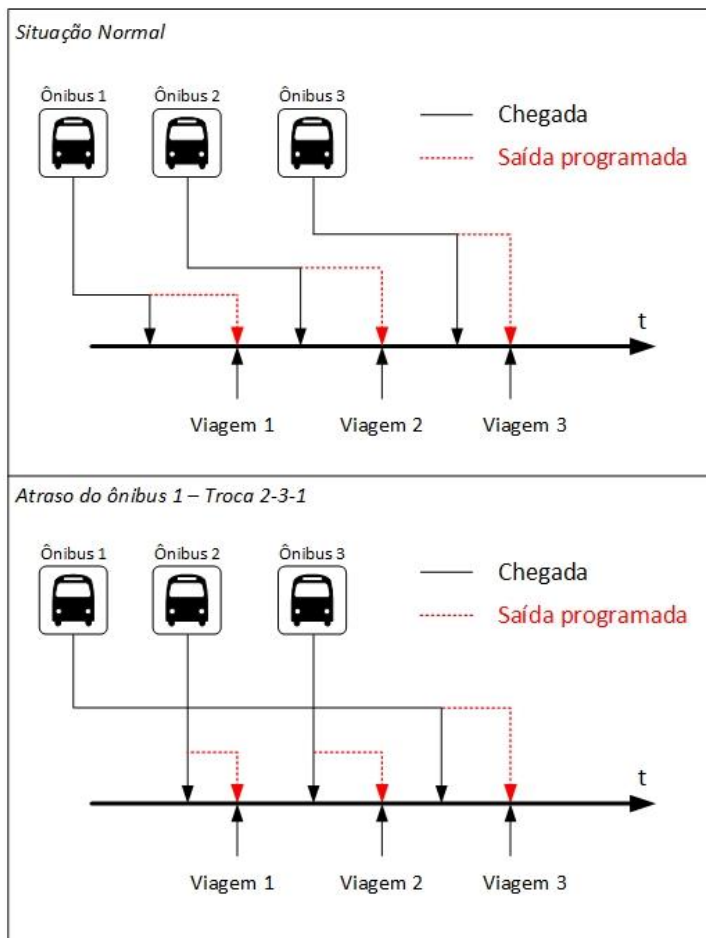
$$P_{231k} = \frac{P(A_{k+1} \leq D_k)P(A_{k+2} \leq D_{k+1})P(D_{k+1} < A_k \leq D_{k+2})R_{base}}{r_k r_{k+1} r_{k+2}} \quad (14)$$

A probabilidade total para todos os eventos desse tipo é

$$R_{231} = \sum_{k=1}^{m-2} P_{231k} \quad (15)$$

A Figura 6 ilustra a troca 2-3-1.

**Figura 6** – Troca 2-3-1.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

O limite inferior para a confiabilidade total do sistema utilizando a estratégia de controle proposta é a soma de todos os termos das categorias de manutenção da programação, e é dado por

$$R_{total} = R_{base} + R_{NN} + R_{2NN} + R_{231} \quad (16)$$

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo de caso teve como objetivo a aferição dos benefícios potenciais da utilização de uma estratégia de reprogramação num caso específico. A análise consiste na investigação de como o sistema proposto poderia melhorar aderência à programação num sistema de TP, dadas uma tabela de horários e características de operação pré-definidas. A análise foi baseada no critério de confiabilidade previamente descrito e seus resultados são apresentados nesta seção.

Dada a programação atual para as linhas analisadas, o cálculo da confiabilidade é feito com base na análise estatística do histórico da operação. O resultado encontrado é de que o sistema opera atualmente com  $R_{01} = 1,1484\%$  e  $R_{02} = 0,0499\%$  em cada linha, resultando numa confiabilidade total de  $R_0 = 0,00057\%$ , que equivale a probabilidade de que essa programação seja cumprida (todas as saídas sejam realizadas pontualmente nas duas linhas). Foi considerado que cada ônibus é designado a um único bloco de viagens, o que implica num requerimento de frota de  $25 + 29 = 54$  veículos. Pode-se demonstrar que a regra LIFO e as previsões imprecisas para os tempos de viagem, utilizadas como base para a construção da programação atual, são os maiores responsáveis pela baixa confiabilidade encontrada. Por outro lado, deve-se ressaltar que a menor confiabilidade de uma viagem específica na programação atual é  $r_{2155} = 60,23\%$ .

A segunda parte da análise supõe a execução da estratégia de reprogramação, considerando a tabela de horários atual, mas supondo que não há nenhum histórico disponível. Nesse caso, o primeiro passo é a construção de uma programação base que utiliza como entradas as previsões de tempos de viagem fornecidas pela companhia. Aplicando o método da função de déficit, chega-se a um requerimento de frota de 2, 4 e 17 ônibus para os terminais A, B e C, respectivamente. O Apêndice D exibe os gráficos das funções de déficit construídas com base nas previsões de tempo de viagem feitas pela companhia. A programação base é feita utilizando a regra FIFO, gerando os blocos de viagem para a operação e considerando que a frota mencionada começa o período de operação nos respectivos terminais. Essa nova programação consiste em  $2 + 4 + 17 = 23$  blocos de viagem para levar a cabo a operação em ambas as linhas.

A utilização desta programação permite a redução da frota e balanceamento do número de viagens em cada bloco (todos os blocos possuem aproximadamente o mesmo número de viagens). A nova confiabilidade do sistema é  $R_{base} = 0,17\%$ , o que, mesmo ainda baixa,

representa um aumento significativo da medida anterior. Adicionalmente, surgem diversas opções para a execução de modificações na programação em resposta aos desvios na operação planejada. Por exemplo, o despachante poderia executar a reprogramação procurando e selecionando veículos 5 minutos antes de cada viagem. Se o veículo previamente alocado para uma determinada viagem não fosse encontrado no terminal, o despachante poderia realizar a reprogramação automaticamente, executando a troca adequada. A Tabela 3 apresenta o limite inferior da confiabilidade do sistema, desagregado por terminal e com a contribuição dos tipos de troca anteriormente mencionados. Com a execução do controle operacional, o novo limite inferior para a confiabilidade do sistema é  $R_{total} = 1,36\%$ .

**Tabela 3** - Confiabilidade da operação controlada.

Terminal	Veículos	$R_{base}$	$R_{NN}$	$R_{2NN}$	$R_{231}$	$R_{total}$
A	2	66,86%	0,05%	-	0,00%	-
B	4	58,30%	0,03%	-	0,00%	-
C	17	0,44%	0,40%	-	0,05%	-
TOTAL	23	0,17%	0,48%	0,64%	0,06%	1,36%

Fonte: desenvolvido pelo autor.

A terceira parte da análise consiste em utilizar os dados históricos da operação para a construção da programação base. Aplica-se então o método da função de déficit utilizando os 80º percentis dos tempos de viagens das curvas de distribuição de probabilidade ajustadas pelo histórico da operação, geradas pelos modelos estatísticos. O Apêndice D traz os gráficos das funções de déficit para este caso. A nova frota necessária calculada é de 2, 4 e 18 ônibus nos terminais A, B e C, respectivamente. A Tabela 4 exhibe o novo limite inferior para a confiabilidade do sistema.

É possível notar que a única mudança acontece no Terminal C, que opera nas duas linhas. No caso, a frota mínima calculada passa a ser 24 veículos, de forma que o novo veículo é adicionado ao Terminal C, alterando a confiabilidade deste terminal de  $R_C = 0,17\%$  com 17 veículos para  $R_C = 33,63\%$  com 18 veículos. O sistema agora opera com uma confiabilidade de  $R_{total} = 42,35\%$ , um aumento da ordem de  $10^4$  na probabilidade inicial de saída pontual para todas as viagens do sistema.

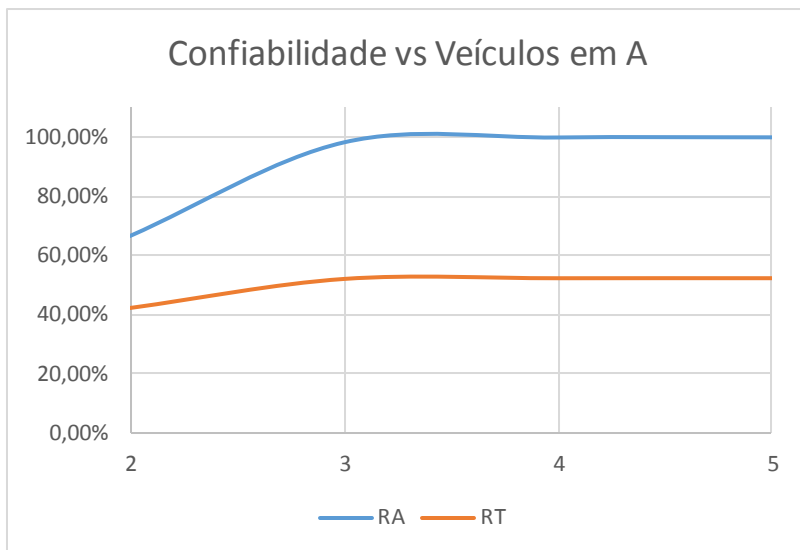
**Tabela 4** - Nova confiabilidade da operação controlada.

Terminal	Veículos	$R_{base}$	$R_{NN}$	$R_{2NN}$	$R_{231}$	$R_{total}$
A	2	66,86%	3,43%	-	0,16%	-
B	4	58,30%	2,65%	-	0,06%	-
C	18	33,63%	10,78%	-	1,84%	-
TOTAL	24	13,11%	16,86%	10,31%	2,06%	42,35%

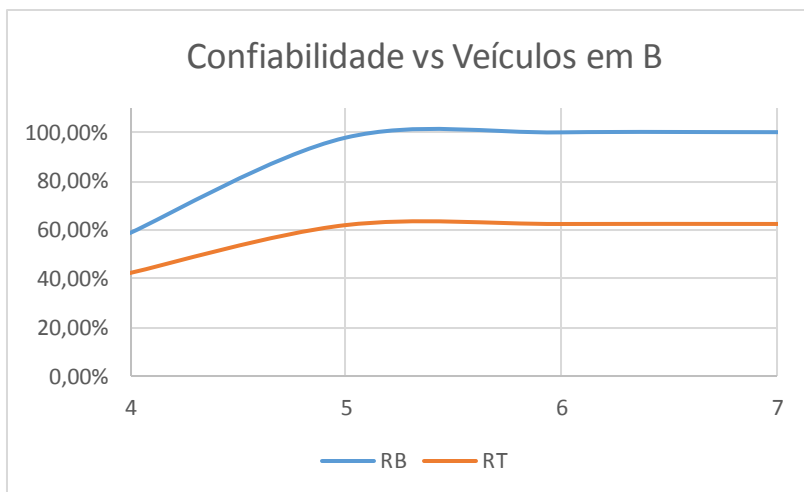
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Neste ponto, deve-se ressaltar que o método da função de déficit é uma ferramenta eficaz para a determinação de uma frota mínima, mas que não é necessariamente uma frota ótima. O incremento do número de veículos em cada terminal permite o contínuo aumento da confiabilidade do sistema e pode ser realizado através de uma análise do benefício marginal da adição de veículos em cada terminal. As figuras Figura 7, Figura 8 e Figura 9 exibem os gráficos da confiabilidade específica de cada terminal e a confiabilidade total resultante para cada veículo que é adicionado em cada terminal, mantendo-se a frota dos demais terminais fixas, a partir da frota mínima estabelecida pelo método da função de déficit (2, 4 e 18 veículos nos terminais A, B e C, respectivamente).

A adição de 1 veículo ao Terminal A (aumentando a frota para 3 veículos), sem alterar as frotas dos outros terminais, aumenta a confiabilidade deste Terminal de  $R_A = 66,86\%$  para  $R_A = 98,29\%$ , um benefício marginal de 31,43% nesta medida. Este benefício cai abruptamente com a adição consecutiva de novos veículos, sendo que a alocação de um quarto veículo ao Terminal A eleva a confiabilidade deste terminal somente em 1,65%. O impacto na confiabilidade do sistema é menor, mas como esta é dependente do produto das confiabilidades dos 3 terminais, está limitada pelas confiabilidades dos Terminais B e C, de forma que o máximo valor que a confiabilidade da programação base pode alcançar aumentando-se apenas a frota em A é de  $R_{total} = 52,16\%$ .

**Figura 7** – Confiabilidade versus veículos no Terminal A

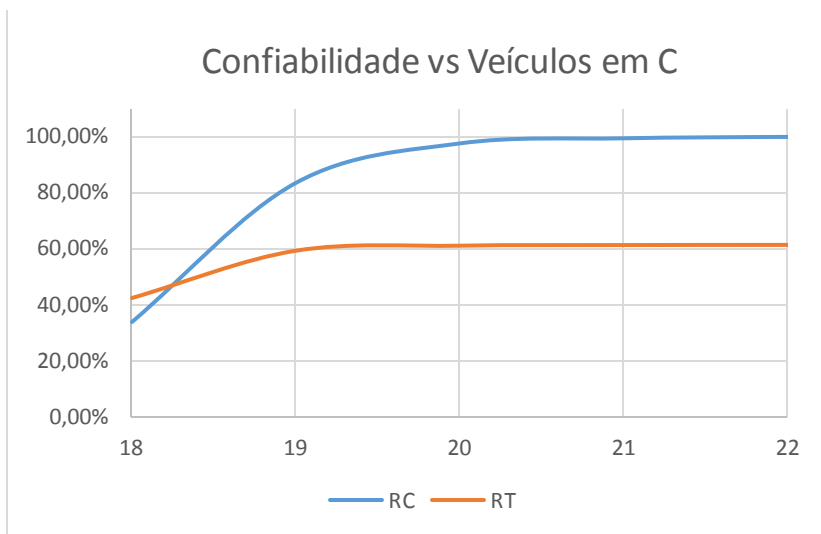
Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Figura 8** - Confiabilidade versus veículos no Terminal B

Fonte: desenvolvido pelo autor.

No caso do Terminal B, a adição de um novo veículo (aumentando a frota para 5 veículos) eleva a confiabilidade de  $R_B = 58,30\%$  para  $R_B = 97,68\%$ , um benefício marginal de 39,4%. A adição de um sexto veículo, como no caso anterior, irá provocar pouco impacto na confiabilidade, resultando em  $R_B = 99,90\%$ , um incremento marginal de 2,22% na confiabilidade em B. A confiabilidade da programação base decorrente da adição de veículos em B, conforme mencionado anteriormente, está limitada pelas confiabilidades dos outros Terminais, e terá o limite superior  $R_{total} = 62,74\%$ .

**Figura 9** - Confiabilidade versus veículos no Terminal C



Fonte: desenvolvido pelo autor.

A adição de veículos no Terminal C também apresenta o maior benefício marginal ao incrementar-se a frota em 1 veículo, de 18 para 19. Neste caso, o benefício marginal deste incremento é de 49,72%, de  $R_C = 33,63\%$  para  $R_C = 83,35\%$ . No caso do Terminal C, um novo incremento na frota ainda proporciona um benefício marginal significativo, chegando-se a  $R_C = 97,47\%$ .

Percebe-se que, partindo-se da frota mínima determinada pelo método da função de déficit, e como já mencionado, a adição de veículos aos terminais terá impacto positivo na confiabilidade. Contudo, este impacto será cada vez menor na medida em que se segue aumentando a



frota. Considerando o exposto, a configuração final recomendada neste estudo de caso é a que resulta da adição de 1 único veículo em cada terminal, totalizando 27 veículos. A Tabela 5 apresenta os números relativos a esta situação. Demonstra-se ser possível alcançar uma confiabilidade total cujo limite inferior é igual a 97,88% com a utilização da estratégia de reprogramação. Deve-se notar que, apesar de ser possível um novo incremento de 14,12% na confiabilidade do Terminal C ao adicionar-lhe um novo veículo (totalizando 20 veículos neste terminal), a confiabilidade total do sistema, que leva em conta as confiabilidades dos outros terminais e as estratégias de controle da programação, chegaria a  $R_{total} = 99,47\%$ . Isto representa um aumento de 1,62% desta medida, o que, considera-se aqui, não justificaria a adição de um novo veículo.

**Tabela 5** – Confiabilidade da operação com a frota recomendada

Terminal	Veículos	$R_{base}$	$R_{NN}$	$R_{2NN}$	$R_{231}$	$R_{total}$
A	3	98,29%	1,31%	-	0,04%	-
B	5	97,68%	1,63%	-	0,06%	-
C	19	83,35%	12,12%	-	1,43%	-
TOTAL	27	80,03%	15,06%	1,26%	1,54%	97,88%

Fonte: desenvolvido pelo autor.

A programação resultante representa uma redução de 25% no tamanho da frota utilizada em média atualmente (de 36 veículos para 27). O Apêndice F traz a programação para este caso, exibindo separadamente os 27 blocos de viagens, horários de saída programada, chegada prevista (80% de probabilidade) e confiabilidade das viagens e da programação base.

Por fim, deve-se ressaltar o impacto da utilização da regra FIFO na construção da programação. Em termos práticos, a utilização desta regra implica num aumento dos tempos de folga entre viagens. Nos horários em que a frequência de viagens é menor (entre-picos), estas folgas podem chegar a mais de duas horas em alguns casos, conforme pode ser verificado na programação exibida no Apêndice E. Deve-se observar então, que, apesar de possibilitar uma diminuição da frota e aumento da confiabilidade da operação, a adoção da estratégia aqui proposta apresenta algumas importantes implicações práticas.

Primeiramente, o aumento da folga entre viagens acarreta um consequente aumento da ociosidade dos condutores, se se considera que

cada condutor pode conduzir somente um veículo durante o dia de operação, o que, em alguns casos, é um requisito trabalhista local. Adicionalmente, em algumas cidades no Brasil, como é o caso em Florianópolis, os sistemas de transporte ainda utilizam cobradores. Isso implica que, nestes casos, a ociosidade agregada à operação é dobrada para cada folga envolvendo um veículo. Este é um importante aspecto, pois, geralmente, os custos com pessoal estão entre as maiores parcelas da composição dos custos de operação dos sistemas de transporte público no Brasil. Desta forma, percebe-se que surgem alguns desafios para as próximas etapas do planejamento da operação, que irão exigir considerações acerca de custos com pessoal, produtividade, legislação, exigências trabalhistas/sindicais locais e, possivelmente, negociação entre as partes envolvidas.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a avaliação dos impactos da utilização de uma estratégia de controle da programação de veículos na confiabilidade de um sistema de transporte público. Este capítulo discute os resultados, a contribuição científica, as limitações da pesquisa e sugere oportunidades para futuros trabalhos na área.

Por meio de uma revisão de literatura conformou-se um referencial teórico para o embasamento do estudo de caso, englobando os trabalhos destacados nas áreas de planejamento, controle e tecnologias de suporte em TP. Isto permitiu a seleção de uma estratégia de controle na literatura e a proposição de um modelo para sua aplicação num estudo de caso. A partir do processamento de dados e análise estatística da operação de duas linhas de TP, realizou-se uma análise probabilística dos tempos de viagem em preparação a análise. Nesta, foi analisada a operação atual do sistema estudado utilizando o critério de confiabilidade da operação. Por fim, um cenário em que se utiliza o modelo de controle selecionado foi analisado, apresentando ganhos significativos na confiabilidade do sistema. Portanto, verifica-se que o trabalho relatado neste documento foi capaz de atender a todos os objetivos propostos para esta pesquisa.

### 5.1 RESULTADOS E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

O estudo de caso apresentado avaliou a utilização de uma estratégia de reprogramação através da comparação da operação atual numa linha de TP com um cenário em que se utiliza a estratégia selecionada no controle da operação. A análise investigou um sistema de transporte público, com uma tabela de horários e características de operação pré-definidas. A comparação teve como critério a confiabilidade da operação, definida como a probabilidade de que *todas* as viagens programadas possam sair pontualmente dos respectivos terminais, situação na qual se considera que a programação pôde ser cumprida.

A primeira etapa do trabalho consistiu na realização de uma análise estatística dos dados de operação das linhas de ônibus estudadas. Nesta análise foram estudados os tempos de viagem de cada uma das 271 viagens realizadas nas duas linhas entre os três terminais em questão. Estas viagens foram agrupadas por períodos, que tiveram seus tempos de viagem ajustados por curvas de distribuição de probabilidade, utilizando a distribuição Lognormal como referência. Desta forma, passou a ser possível determinar com que probabilidade um veículo de uma linha específica, operando num sentido específico, poderia terminar uma

viagem que saiu do terminal num determinado horário num tempo em particular.

Os resultados do estudo de caso demonstraram que o sistema atual opera com uma confiabilidade significativamente baixa, menor que 1%. Isso quer dizer que, num dia normal de operação (no caso estudado foi utilizada a tabela de horários de dias úteis), a chance de que ao menos uma das 271 viagens não comece pontualmente é maior que 99%. Deve-se novamente ressaltar que o critério de confiabilidade utilizado é bastante severo, pois é obtido pelo produto das confiabilidades de cada viagem. Estas, por sua vez, são definidas como a probabilidade de que o ônibus que deveria realizar a viagem em questão esteja no terminal antes do horário de saída da mesma. Desta forma, se uma viagem possui uma baixa confiabilidade, esta irá afetar fortemente a confiabilidade da operação, o que no caso de um sistema com várias viagens resulta num valor significativamente baixo para esta medida. Outrossim, no sistema analisado, a confiabilidade da operação também é influenciada pela forma como é realizada a programação atual para os veículos. No caso, a regra LIFO para a construção da programação dos veículos resulta em pouco tempo de folga entre viagens, o que, por sua vez, diminui a confiabilidade de algumas viagens.

O primeiro passo para a implementação da estratégia de controle é a construção de uma nova programação, chamada aqui de *programação base*. Esta programação parte do princípio de que os ônibus num dado terminal podem operar em qualquer linha, desde que respeitem a ordem de chegada no terminal (regra FIFO). A ideia por trás da programação base é simular uma “operação natural”, como se nenhum veículo fosse previamente alocado a nenhuma viagem, apenas despachados segundo a ordem de chegada. Esta programação parte da determinação de uma frota mínima, que é calculada com base no método da função de déficit (CEDER; STERN, 1981).

No estudo de caso, para fins de comparação, a frota mínima foi determinada primeiramente utilizando as previsões de tempos de viagem fornecidas pela empresa, resultando numa frota mínima de 23 veículos. Posteriormente, o mesmo método é aplicado, desta vez utilizando uma previsão de tempo de viagem baseada na análise estatística dos dados de operação. Neste caso, as previsões de tempo de viagem equivalem aos 80º percentis das curvas de distribuição de probabilidade para os mesmos. Este cálculo resultou numa frota mínima com 24 veículos (2 veículos no Terminal A, 4 veículos no Terminal B e 18 veículos no Terminal C). Sem nenhum tipo de controle, a frota mínima determinada a partir das previsões da companhia (23 veículos) implica numa confiabilidade da

operação de 0,17%. Já a frota mínima calculada com os 80º percentis resulta numa confiabilidade da operação de 13,11%. Dessa forma, esta frota é então utilizada como base para a estratégia de controle.

Com a adoção da estratégia de controle, os atrasos nas saídas são evitados pela realocação de veículos. Isto é feito através da substituição de um veículo que se encontra atrasado para uma determinada viagem por um veículo que já se encontra no terminal. Se esta ação possibilitar que nenhum atraso ocorra, considera-se que a programação pôde ser cumprida. As maneiras pelas quais isto poderia ocorrer são inúmeras, o que impossibilita um cálculo exato da confiabilidade da operação. Ao invés disso, são testados os três casos de reprogramação que provaram influenciar mais fortemente esta medida (FURTH; NASH, 1985), de forma que a confiabilidade da operação calculada é, na verdade, um limite inferior para a mesma. Utilizando a programação base e as estratégias de controle, é possível alcançar uma confiabilidade da operação de, no mínimo, 42,35%.

Considerando que a frota mínima é apenas uma referência, e não uma recomendação, o passo seguinte da análise foi avaliar o benefício marginal da adição de veículos ao sistema, em cada terminal. Constatou-se que, adicionando-se poucos veículos ao sistema, já é possível obter uma alta confiabilidade para a operação. Com base nesta análise, recomenda-se uma frota de 27 veículos para a operação das duas linhas (3 veículos no Terminal A, 5 veículos no Terminal B e 19 veículos no Terminal C; o que equivale a adição de 1 veículo em cada terminal). Neste caso, os resultados indicam que, com a adoção da estratégia de controle é possível alcançar um limite inferior de 97,88% para a confiabilidade da operação. Adicionalmente, a frota resultante é 25% menor que a usada em média atualmente pela companhia.

A partir da seleção de um modelo de controle simples, que garante a pontualidade das saídas dos veículos no terminal, este trabalho apresentou uma possibilidade viável para o aumento da confiabilidade num caso específico de operação de TP. Adicionalmente, o trabalho resgata uma estratégia de controle pensada num contexto em que os recursos tecnológicos eram escassos, apresentando uma possibilidade interessante para o uso da tecnologia atualmente disponível. De forma concreta, a estratégia descrita poderia ser aplicada fazendo-se uso de um sistema AVL e uma cerca eletrônica<sup>9</sup>. A cada entrada de veículo no terminal, o sistema de controle operacional registraria essa entrada e

---

<sup>9</sup> Por cerca eletrônica refere-se aqui ao conjunto de equipamentos que realizam a detecção e registro da entrada de um veículo no terminal.

conformaria uma fila em ordem de chegada, onde seriam buscados candidatos para a realização de viagens para as quais os veículos originalmente alocados se encontrem atrasados. De fato, são inúmeras as maneiras pelas quais isto poderia ser feito. Assim sendo, o trabalho contribui positivamente para a pesquisa na área, ao indicar uma oportunidade factível para o aumento do nível de serviço da operação.

## 5.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Este trabalho esteve limitado pelo tempo, informação e recursos disponíveis, além do escopo, de forma que não foram analisados os impactos da utilização da estratégia descrita em termos de custos e das implicações nas fases posteriores do planejamento da operação. Para a aplicação da estratégia, faz-se necessária uma investigação de sua operacionalização e implicações práticas.

Desta forma, futuros trabalhos são altamente recomendados. Uma continuação para esta análise poderia utilizar o mesmo caso numa simulação computacional, que serviria para validar os resultados encontrados. O estudo também poderia ser ampliado, de forma a englobar todas as linhas de ônibus do sistema de TP analisado, ou algum outro caso para o qual haja informações disponíveis. Outras análises poderiam investigar como a estratégia mudaria a alocação de condutores e suas implicações em termos de custo com pessoal. A operacionalização da estratégia também deve ser estudada, em termos de espaço para estacionamento de veículos em espera e fluxo entre garagens e terminais, além de questões envolvendo horários de descanso, almoço e necessidade de horas extras. Por fim, também recomenda-se o estudo das necessidades em termos de infraestrutura (hardware) e sua integração (software) para a aplicação da estratégia de reprogramação.

## REFERÊNCIAS

- ABKOWITZ, M. D.; LEPOFSKY, M. Implementing Headway-Based Reliability Control on Transit Routes. **Journal of Transportation Engineering**, v. 116, n. 1, p. 49–63, jan. 1990.
- ABKOWITZ, M.; EIGER, A.; ENGELSTEIN, I. Optimal control of headway variation on transit routes. **Journal of Advanced Transportation**, v. 20, n. 1, p. 73–88, dez. 1986.
- ABKOWITZ, M.; TOZZI, J. Research contributions to managing transit service reliability. **Journal of Advanced Transportation**, v. 21, n. 1, p. 47–65, 1987.
- BARABINO, B.; DI FRANCESCO, M.; MOZZONI, S. Regularity diagnosis by Automatic Vehicle Location raw data. **Public Transport**, v. 4, n. 3, p. 187–208, 14 mar. 2013.
- BARABINO, B.; DI FRANCESCO, M.; MOZZONI, S. An Offline Framework for Handling Automatic Passenger Counting Raw Data. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 6, p. 2443–2456, dez. 2014.
- BARNETT, A. On Controlling Randomness in Transit Operations. **Transportation Science**, v. 8, n. 2, p. 102–116, maio 1974.
- BARTHOLDI, J. J.; EISENSTEIN, D. D. A self-coordinating bus route to resist bus bunching. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 4, p. 481–491, maio 2012.
- BELL, M. G. H. Future directions in traffic signal control. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 26, n. 4, p. 303–313, jul. 1992.
- BLY, P. H.; JACKSON, R. L. **Evaluation of bus control strategies by simulation**. 637. ed. Crowthorne: Transport And Road Research Laboratory, 1974. (TRRL Report).
- BOLDT, Roger. **Synthesis of Transit Practice 35**: Information Technology Update for Transit. Washington, D.c: Transportation Research Board, National Research Council, 2000. 40 p. (TCRP Synthesis).
- BOWMAN, L. A.; TURNQUIST, M. A. Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. **Transportation Research Part A: General**, v. 15, n. 6, p. 465–471, 1981.

CASELLO, J. M.; NOUR, A.; HELLINGA, B. Quantifying Impacts of Transit Reliability on User Costs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2112, p. 136–141, 2010.

CATS, O. et al. Impacts of Holding Control Strategies on Transit Performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2216, n. -1, p. 51–58, dez. 2011.

CATS, O. et al. Bus-Holding Control Strategies. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2274, p. 100–108, dez. 2012.

CEDER, A. **Public Transit Planning and Operation: Theory, Modelling and Practice**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2007.

CEDER, A.; STERN, H. I. Deficit Function Bus Scheduling with Deadheading Trip Insertions for Fleet Size Reduction. **Transportation Science**, v. 15, n. 4, p. 338–363, nov. 1981.

CHANDRASEKAR, P.; LONG CHEU, R.; CHIN, H. C. Simulation Evaluation of Route-Based Control of Bus Operations. **Journal of Transportation Engineering**, v. 128, n. 6, p. 519–527, nov. 2002.

CHEN, M. et al. A Dynamic Bus-Arrival Time Prediction Model Based on APC Data. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 19, n. 5, p. 364–376, set. 2004.

CORTÉS, C. E. et al. Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 18, n. 5, p. 757–769, out. 2010.

CORTÉS, C. E. et al. Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 4, p. 695–707, ago. 2011.

CORTÉS, C. E.; JARA-DÍAZ, S.; TIRACHINI, A. Integrating short turning and deadheading in the optimization of transit services. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 45, n. 5, p. 419–434, jun. 2011.

D'ACIERNO, L.; CARTENÌ, A.; MONTELLA, B. Estimation of urban traffic conditions using an Automatic Vehicle Location (AVL) System. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 719–736, 16 jul. 2009.



DADUNA, J. R. The Integration of Computer-aided Systems for Planning and Operational Control in Public Transit. In: DESROCHERS, M.; ROUSSEAU, J.-M. (Eds.). . **Computer-Aided Transit Scheduling**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. p. 347–358.

DADUNA, J. R.; BRANCO, I.; PAIXÃO, J. M. P. (EDS.). **Computer-Aided Transit Scheduling**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. v. 430

DADUNA, J. R.; WREN, A. (EDS.). **Computer-Aided Transit Scheduling**. Berlin: Springer-Verlag, 1988. v. 308

DAGANZO, C. F. A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 43, n. 10, p. 913–921, dez. 2009.

DAGANZO, C. F.; PILACHOWSKI, J. Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 1, p. 267–277, jan. 2011.

DELGADO, F.; MUNOZ, J. C.; GIESEN, R. How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance? **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 9, p. 1202–1217, nov. 2012.

DELLE SITE, P.; FILIPPI, F. Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 32, n. 1, p. 19–38, jan. 1998.

DESAULNIERS, G.; HICKMAN, M. D. Public Transit. In: BARNHART, C.; LAPORTE, G. (Eds.). . **Handbook in OR & MS**. [s.l.] Elsevier B.V., 2007. p. 69–127.

DESROCHERS, M.; ROUSSEAU, J.-M. (EDS.). **Computer-Aided Transit Scheduling**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. v. 386

DESSOUKY, M. et al. Real-time control of buses for schedule coordination at a terminal. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 37, n. 2, p. 145–164, fev. 2003.

DIAB, E. I.; BADAMI, M. G.; EL-GENEIDY, A. M. Bus Transit Service Reliability and Improvement Strategies: Integrating the Perspectives of Passengers and Transit Agencies in North America. **Transport Reviews**, v. 35, n. 3, p. 292–328, 2015.

EBERLEIN, X. J. et al. The real-time deadheading problem in transit

operations control. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 32, n. 2, p. 77–100, fev. 1998.

FURTH, P. G. Zonal Route Design for Transit Corridors. **Transportation Science**, v. 20, n. 1, p. 1–12, fev. 1986.

FURTH, P. G.; NASH, A. B. Vehicle Pooling in Transit Operations. **Journal of Transportation Engineering**, v. 111, n. 3, p. 268–279, maio 1985.

HALL, R.; DESSOUKY, M.; LU, Q. Optimal holding times at transfer stations. **Computers & Industrial Engineering**, v. 40, n. 4, p. 379–397, set. 2001.

HE, Q.; HEAD, K. L.; DING, J. Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 46, p. 65–82, set. 2014.

HICKMAN, M. D.; WILSON, N. H. M. Passenger travel time and path choice implications of real-time transit information. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 3, n. 4, p. 211–226, ago. 1995.

HICKMAN, M.; MIRCHANDANI, P. B.; VOSS, S. (EDS.). **Computer-aided Systems in Public Transport**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. v. 600

HIDALGO, D. Citywide Transit Integration in a Large City. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2114, n. -1, p. 19–27, dez. 2009.

IBARRA-ROJAS, O. J. et al. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 77, p. 38–75, 2015.

JACKSON, R. L. **Evaluation by Simulation of Control Strategies for a High Frequency Bus Service**. Crowthorne: Transport And Road Research Laboratory, 1977. 23 p. (TRRL Report LR 807).

JORDAN, W. C.; TURNQUIST, M. A. Zone Scheduling of Bus Routes to Improve Service Reliability. **Transportation Science**, v. 13, n. 3, p. 242–268, ago. 1979.

JUN, C.; DONGYUAN, Y. Estimating Smart Card Commuters Origin-Destination Distribution Based on APTS Data. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 13, n. 4, p. 47–53, ago. 2013.

KRAUS, W. et al. Cost Effective Real-Time Traffic Signal Control Using the TUC Strategy. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 2, n. 4, p. 6–17, jan. 2010.

LADEIRA, M.; MICHEL, F.; SENNA, L. **Public Transport Monitoring and Control: The Case of Porto Alegre, Brazil**. ICTIS 2011. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 16 jun. 2011. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41177\(415\)35](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41177(415)35)>

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science: International Journal of an Emerging Transdiscipline**, v. 9, p. 181–212, 2006.

LI, J.-Q.; MIRCHANDANI, P. B.; BORENSTEIN, D. The vehicle rescheduling problem: Model and algorithms. **Networks**, v. 50, n. 3, p. 211–229, out. 2007.

LI, J.-Q.; MIRCHANDANI, P. B.; BORENSTEIN, D. A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 45, n. 3, p. 419–433, maio 2009.

LIU, Z. et al. Bus stop-skipping scheme with random travel time. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 35, p. 46–56, out. 2013.

MUÑOZ, J. C. et al. Comparison of dynamic control strategies for transit operations. **Transportation Research: Part C**, v. 28, p. 101–113, mar. 2013.

MUSEUM, L. T. **Depot Discoveries - Bus Electronic Scanning Indicator - with extra footage**, 2014. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=xUGyMkHVJfI>>

NEWELL, G. F. Dispatching Policies for a Transportation Route. **Transportation Science**, v. 5, n. 1, p. 91–105, fev. 1971.

NEWELL, G. F. Control of Pairing of Vehicles on a Public Transportation Route, Two Vehicles, One Control Point. **Transportation Science**, v. 8, n. 3, p. 248–264, ago. 1974.

NEWELL, G. F. Unstable Brownian Motion of a Bus Trip. In: LANDMAN, U. (Ed.). **Statistical Mechanics and Statistical Methods in Theory and Application**. New York: Plenum Press, 1977. p. 645–667.

OORT, N. VAN. **Service Reliability and Urban Public Transport Design**. [s.l.] TRAIL Research School, 2011.

OSUNA, E. E. The psychological cost of waiting. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 29, n. 1, p. 82–105, mar. 1985.

OSUNA, E. E.; NEWELL, G. F. Control Strategies for an Idealized Public Transportation System. **Transportation Science**, v. 6, p. 52–72, 1972.

PICK, T. S.; READMAN, A. The Recognition of Moving Vehicles by Electronic Means. **IEE Proceedings - Part B**, v. 106, n. 26, p. 186–195, 1959.

POST, R. C. **Urban Mass Transit: the life story of a technology**. Westport, Connecticut: Greenwood Press, 2007.

SÁEZ, D. et al. Hybrid predictive control strategy for a public transport system with uncertain demand. **Transportmetrica**, v. 8, n. 1, p. 61–86, jan. 2012.

SENEVIRANTE, P. N. Analysis of On-Time Performance of Bus Services Using Simulation. **Journal of Transportation Engineering**, v. 116, n. 4, p. 517–531, jul. 1990.

SIDI, M. M. O. et al. Urban Transport Network Regulation and Evaluation: A Fuzzy Evolutionary Approach. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans**, v. 38, n. 2, p. 309–318, mar. 2008.

SUN, A.; HICKMAN, M. The Real-Time Stop-Skipping Problem. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, v. 9, n. 2, p. 91–109, 1 abr. 2005.

TURNQUIST, M. A.; BOWMAN, L. A. The effects of network structure on reliability of transit service. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 14, n. 1, p. 79–86, 1980.

VANDEBONA, U.; RICHARDSON, A. J. Effect of checkpoint control strategies in a simulated transit operation. **Transportation Research Part A: General**, v. 20, n. 6, p. 429–436, 1986.

VISENTINI, M. S. et al. Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. **Journal of Scheduling**, v. 17, n. 6, p. 541–567, 12 dez. 2014.

VOLPE NATIONAL TRANSPORTATION SYSTEMS CENTER (Usa). Research And Special Programs Administration. **Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art - Update '98**. Cambridge, Ma: U.s. Department Of Transportation, 1998. 206 p.

VOSS, S.; DADUNA, J. R. (EDS.). **Computer-Aided Transit Scheduling**. Berlin: Springer-Verlag, 2001. v. 505

VOUCHIC, V. R. **Urban Transit: Operations, Planning and Economics**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

WILSON, N. H. M. (ED.). **Computer-Aided Transit Scheduling**. [s.l.: s.n.]. v. 471

WIRASINGHE, S. C.; LIU, G. Determination of the number and locations of time points in transit schedule design — Case of a single run. **Annals of Operations Research**, v. 60, n. 1, p. 161–191, dez. 1995.

XUAN, Y.; ARGOTE, J.; DAGANZO, C. F. Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 10, p. 1831–1845, dez. 2011.

YANG, H.; LUO, D. Acyclic Real-Time Traffic Signal Control Based on a Genetic Algorithm. **Cybernetics and Information Technologies**, v. 13, n. 3, p. 111–123, 1 jan. 2013.

YAO, B. et al. Transit network design based on travel time reliability. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 43, p. 233–248, 2014.

YU, B.; YANG, Z.; LI, S. Real-time partway deadheading strategy based on transit service reliability assessment. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 46, n. 8, p. 1265–1279, out. 2012.

ZHAO, J. Z. J.; BUKKAPATNAM, S.; DESSOUKY, M. M. Distributed architecture for real-time coordination of bus holding in transit networks. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 4, n. July, p. 0–34, 2003.

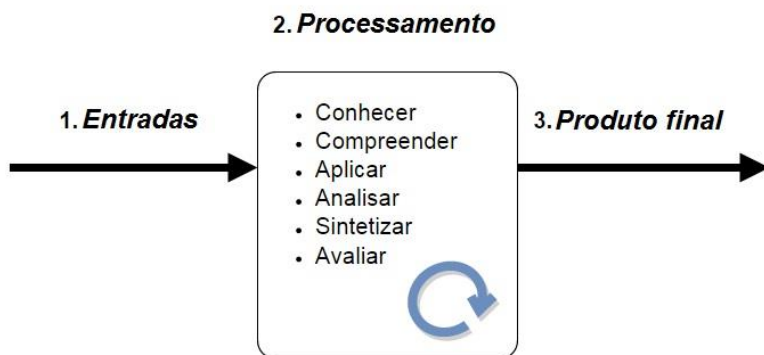
ZOLFAGHARI, S.; AZIZI, N.; JABER, M. Y. A model for holding strategy in public transit systems with real-time information. **International Journal of Transport Management**, v. 2, n. 2, p. 99–110, jan. 2004.



## APÊNDICE A – O Processo de Revisão de Literatura

A condução da revisão de literatura para construção do referencial teórico foi baseada no modelo proposto por Levy e Ellis (2006), que definem a revisão de literatura como um processo sequencial para *selecionar, conhecer, compreender, aplicar, analisar, sintetizar e avaliar* literatura qualificada, com o intuito de prover uma base sólida para uma determinada pesquisa. Este modelo divide esse processo em três etapas, sejam *entradas, processamento* e *produto final*, conforme o diagrama esquemático exibido na Figura 10. Esta seção descreve a etapa de *entradas*, que consiste do processo de busca e seleção do material a ser revisado. O resultado das etapas posteriores, ou seja, o produto final, é a própria revisão de literatura, apresentada no capítulo anterior.

**Figura 10** - Modelo de revisão de literatura



Fonte: Adaptado de Levy e Ellis (2006).

O início do processo parte da definição do eixo de pesquisa Transporte Público (TP). A seleção do material é restrita a artigos em língua inglesa de periódicos científicos revisados por pares, atas de conferências relevantes e livros que fossem referências destacadas. Os livros são o ponto de partida da pesquisa por apresentarem uma visão geral e oferecerem um conjunto de referências primárias. Foram escolhidos *Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice* (CEDER, 2007) e *Urban Transit: Operations, Planning and Economics* (VUCHIC, 2005), encontrados na ementa da disciplina *Public Transportations Systems* oferecida no programa de pós-graduação em

Engenharia Civil no MIT (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2015).

Em razão da vastidão do corpo de conhecimento em TP, decidiu-se restringir a busca por artigos científicos a trabalhos focados no controle de operações em tempo-real e uso de tecnologias de controle e monitoramento. Os primeiros artigos revisados foram referências destacadas nos livros selecionados, e serviram para a construção de um banco de palavras-chave (Quadro 2), a partir do qual foram criados os termos de busca utilizados nas pesquisas nos indexadores e bases de dados. As palavras-chave foram agrupadas em três categorias, de forma a facilitar o inventário dos termos relevantes no escopo da pesquisa proposta.

**Quadro 2-** Banco de palavras-chave

<b>TP</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Estratégias</b>
"public transportation"	"real-time"	"holding"
"public transport"	"APTS"	"dispatching"
"public transit"	"AVL"	"skip-stop"
"mass transportation"	"APC"	"interlining"
"mass transit"	"CAD"	"vehicle pooling"
"urban transit"	"AVM"	"deadheading"
	"passenger counting"	"short-turn"
	"monitoring"	"short-cut"
	"assisted dispatching"	"leapfrogging"
	"decision support tools"	"control strategies"
	"computer-aided"	"operations strategies"
	"automatic vehicle location"	"operational control"
	"computer-assisted"	"time point"
		"control point"
		"control"

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Os termos de busca são conformados pela concatenação de palavras-chave e operadores lógicos utilizados nos indexadores e bases de dados (*AND* e *OR*), e descrevem conjuntos dentro do corpo de

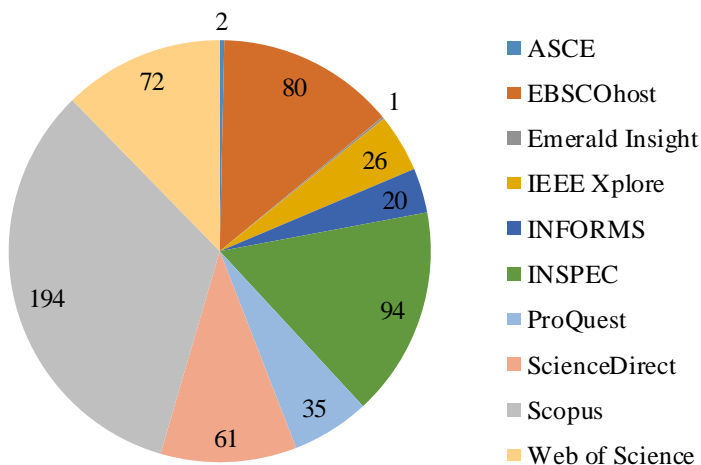


conhecimento sobre os quais será realizada a busca por artigos. No caso da busca por artigos, deseja-se selecionar artigos que tratem do controle ou execução de estratégias operacionais em TP através de tecnologias de suporte. Assim, a busca é feita na interseção das três categorias, representadas pelos respectivos conjuntos de palavras-chave. Os termos de busca correspondentes as buscas são dados pela expressão:

("public transportation" OR "public transport" OR "public transit" OR "mass transportation" OR "mass transit" OR "urban transit") AND ("real-time" OR "APTS" OR "AVL" OR "APC" OR "CAD" OR "AVM" OR "passenger counting" OR "monitoring" OR "assisted dispatching" OR "decision support tools" OR "computer-aided" OR "automatic vehicle location" OR "computer-assisted") AND ("holding" OR "dispatching" OR "skip-stop" OR "interlining" OR "vehicle pooling" OR "deadheading" OR "short-turn" OR "short-cut" OR "leapfrogging" OR "control strategies" OR "operations strategies" OR "operations strategy" OR "operating strategy" OR "operating strategies" OR "operational control" OR "time point" OR "control point" OR "control")

Nem todas as bases de dados irão permitir buscas tão complexas. Consequentemente, o processo de busca é adaptado segundo a base de dados, de acordo com as possibilidades de refinamento. As bases de dados pesquisadas foram ABI Inform Global (Proquest Direct), Academic Search Premier (EBSCOHOST), ASCE, Computers & Applied Sciences Complete - CASC (EBSCOHOST), Emerald Insight, INFORMS, INSPEC (Ovid), IEEE Xplore, Science Direct (Elsevier), Scopus (Elsevier), Web of Science (Thomson Reuters Scientific).

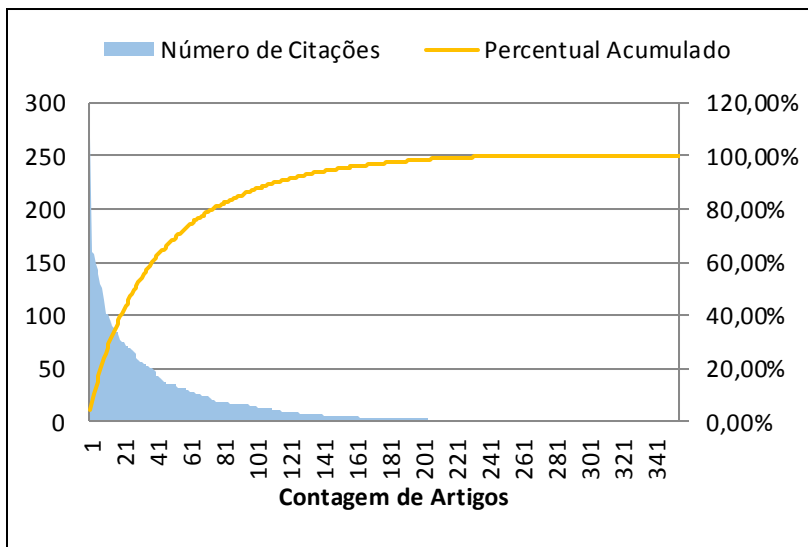
A busca por artigos nas bases de dados resultou num total de 356 artigos, sobre os quais é feito um refinamento a fim de determinar as entradas relevantes e formar um conjunto consistente de referências bibliográficas. Nos resultados da busca, o maior número de ocorrências foi encontrado na base Scopus, com 33% do total (194 artigos). A Figura 11 exibe a distribuição de ocorrências por base de dados. Foram ao todo 585 artigos, dos quais 233 foram excluídos por redundância. Os 352 artigos restantes foram submetidos a uma seleção segundo o número de citações, através do princípio de Pareto, ou “regra 80/20”. Assim, é feita a escolha do conjunto cuja soma do número de citações de seus artigos represente 80% do total de citações. Na análise em questão, o conjunto selecionado é formado por 75 artigos com 4638 citações, representando 80,12% do total, de forma que o último artigo selecionado possui 21 citações. A Figura 12 exibe o gráfico de Pareto.

**Figura 11** - Resultado das buscas em bases de dados

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

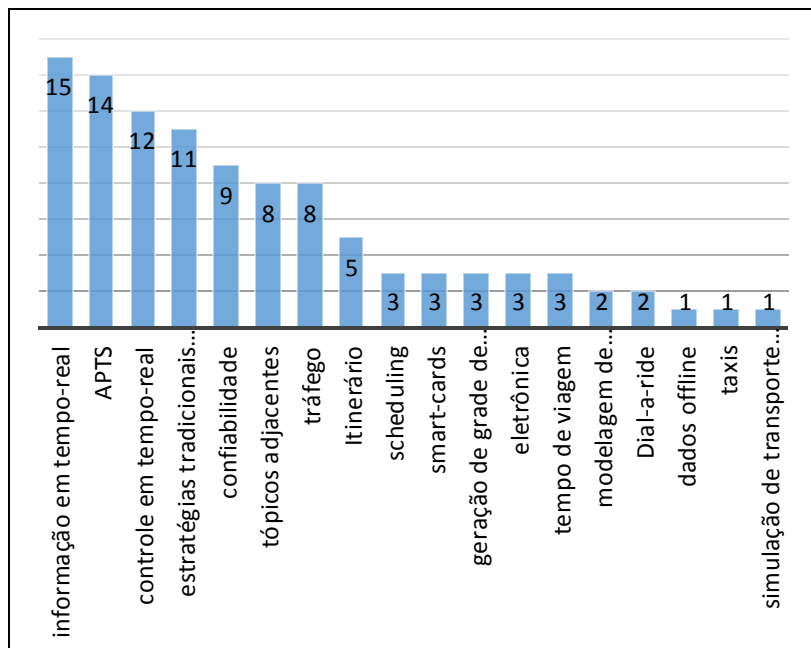
Nos trabalhos excluídos é feita uma repescagem nos anos de 2013, 2014 e 2015, através dos títulos, palavras-chave e resumos, levando em conta que, nesse caso, a atualidade pode ser o motivo para o baixo número de citações. Em concordância com essa suposição, do conjunto selecionado através da análise de Pareto, 80% é anterior a 2010. Nos artigos publicados entre os anos de 2010 e 2012 ainda é feita uma nova busca entre os trabalhos mais citados.

**Figura 12-** Gráfico de Pareto do processo de seleção de artigos.



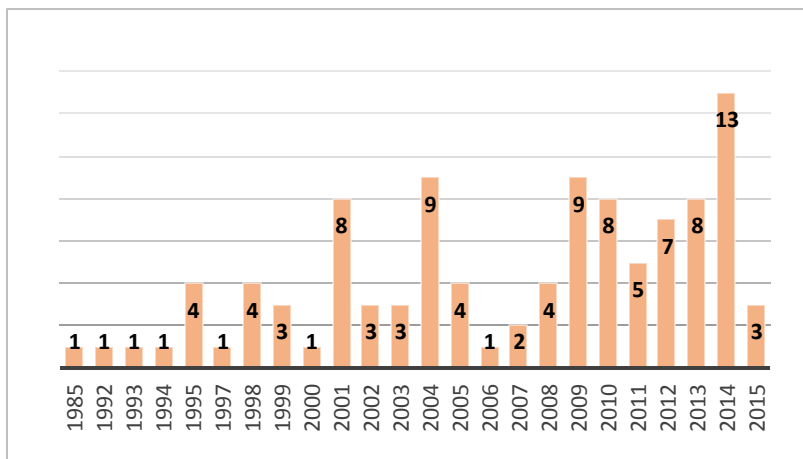
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Com isso, chega-se a um conjunto final com 104 artigos, em que cada um recebeu uma palavra-chave arbitrariamente, de acordo com seu tema central. A Figura 13 mostra a distribuição desses temas entre os resultados. Percebe-se que o tópico mais frequente é “informação em tempo-real”, seguido por “APTS”, “controle em tempo-real”, “estratégias tradicionais de controle” e “confiabilidade”. Os temas mais distantes do foco central do projeto de pesquisa (por exemplo, transporte compartilhado, ônibus customizados, sistemas de vigilância, informações turísticas, etc.) foram agrupados no grupo “tópicos adjacentes”. Artigos relacionados com tráfego viário apresentaram oito ocorrências e 25% do total de artigos selecionados se relacionavam com outros temas.

**Figura 13**-Distribuição dos temas nos artigos selecionados.

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Outras análise de interesse são os artigos selecionados por ano, ilustrada na Figura 14. Na última, são exibidos todos os periódicos que apresentavam duas ou mais ocorrências dentre os artigos selecionados. Vê-se que o primeiro artigo de interesse foi publicado em 1985 (OSUNA, 1985). Em 2001 e em 2004 também se percebe um número considerável de ocorrências e, a partir de 2009, percebe-se uma concentração de trabalhos de interesse. Deve-se ressaltar, entretanto, que nos anos de 2013, 2014 e 2015 houve um segundo processo de seleção que ignorou o número de citações, conforme mencionado anteriormente.

**Figura 14-** Artigos selecionados por ano de publicação.

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O Quadro 3 apresenta a distribuição dos artigos entre os periódicos científicos. Verifica-se que os periódicos Transportation Research Part C, Transportation Research Part A, Transportation Science e IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems se destacam no número de artigos, juntamente com a publicação Transportation Research Record, do Comitê de Pesquisa em Transportes dos EUA (Transportation Research Board). Também aparecem alguns artigos provenientes de atas de conferências, reunidos no periódico “Procedia - Social and Behavioral Sciences”. Todos os artigos restantes, publicados em outros periódicos, representam 50% do conjunto final.

**Quadro 3-** Distribuição dos artigos entre periódicos científicos.

<b>Título do Periódico</b>	<b>Art.</b>
Journal of Transportation Systems Engineering and Inf. Tech.	2
Interfaces	2
Public Transport	2
IEEE Pervasive Computing	2
European Journal of Operational Research	2
Computers & Operations Research	2
IET Intelligent Transport Systems	2
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	2
Transport Policy	3
Procedia - Social and Behavioral Sciences	4
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6
Transportation Research Part A: Policy and Practice	9
Transportation Research Record	9
Transportation Science	10
Transportation Research Part C: (Emerging Technologies)	13

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

## APÊNDICE B - Tabela de horários e blocos de viagem atuais

As tabelas a seguir exibem a programação atual do sistema analisado no estudo de caso. As previsões de chegada exibidas nas tabelas foram as fornecidas pela empresa, baseadas na experiência dos operadores. A confiabilidade, no entanto, é calculada segundo as funções de probabilidade decorrentes da análise estatística do histórico da operação, ajustadas para cada período.

**Tabela 6 (continua)** – Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 1

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>1101</b>	4:40	5:55	3M	1
<b>1102</b>	5:10	6:25	6M	1
<b>1103</b>	5:40	6:55	13M	1
<b>1104</b>	6:10	7:28	1M	0.9991204
<b>1105</b>	6:25	7:43	19M	1
<b>1106</b>	6:45	8:03	5M	0.9993503
<b>1107</b>	7:00	8:23	8M	0.9988323
<b>1108</b>	7:10	8:33	9M	0.9863078
<b>1109</b>	7:25	8:48	3M	0.9954275
<b>1110</b>	7:40	9:03	15M	0.9998955
<b>1111</b>	7:55	9:18	17M	0.9998955
<b>1112</b>	8:10	9:33	6M	0.9998955
<b>1113</b>	8:30	9:53	13M	0.9991427
<b>1114</b>	8:55	10:18	22M	0.9999562
<b>1115</b>	9:25	10:48	19M	0.991385
<b>1116</b>	9:55	11:18	8M	0.8644445
<b>1117</b>	10:25	11:48	3M	0.9428281
<b>1118</b>	10:45	12:08	15M	0.9979582
<b>1119</b>	11:05	12:28	17M	0.9996582
<b>1120</b>	11:25	12:48	23M	1
<b>1121</b>	11:50	13:13	5M	1
<b>1122</b>	12:15	13:38	24M	1

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Tabela 6 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 1

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>1123</b>	12:45	14:08	20M	1
<b>1124</b>	13:15	14:38	27M	0.999999
<b>1125</b>	13:40	15:03	30M	0.9913607
<b>1126</b>	14:05	15:28	32M	1
<b>1127</b>	14:25	15:48	35M	1
<b>1128</b>	14:45	16:08	38M	1
<b>1129</b>	15:05	16:28	40M	1
<b>1130</b>	15:25	16:48	24M	0.9758204
<b>1131</b>	15:45	17:08	41M	1
<b>1132</b>	16:05	17:28	46M	1
<b>1133</b>	16:15	17:38	27M	0.8442191
<b>1134</b>	16:40	18:03	30M	0.9064979
<b>1135</b>	16:50	18:13	36M	1
<b>1136</b>	17:05	18:28	32M	0.9064979
<b>1137</b>	17:25	18:48	23M	1
<b>1138</b>	17:45	19:08	38M	0.8369905
<b>1139</b>	18:05	19:28	40M	0.8369905
<b>1140</b>	18:15	19:38	34M	1
<b>1141</b>	18:25	19:48	24M	0.9390609
<b>1142</b>	18:45	20:08	29M	1
<b>1143</b>	19:05	20:28	46M	0.9890897
<b>1144</b>	19:15	20:38	27M	0.9890897
<b>1145</b>	19:40	21:03	30M	0.9297478
<b>1146</b>	19:50	21:13	41M	1
<b>1147</b>	20:00	21:23	32M	0.8265562
<b>1148</b>	20:20	21:43	35M	1
<b>1149</b>	20:55	22:18	38M	0.9988442
<b>1150</b>	21:45	23:05	29M	0.9980232
<b>1151</b>	22:45	0:05	36M	1
<b>1152</b>	23:40	1:00	35M	0.992861



**Tabela 6 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 1

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>1201</b>	4:50	6:05	1M	1
<b>1202</b>	5:20	6:40	5M	1
<b>1203</b>	5:35	6:55	8M	1
<b>1204</b>	5:45	7:05	9M	1
<b>1205</b>	5:55	7:15	3M	0.9370714
<b>1206</b>	6:05	7:28	15M	1
<b>1207</b>	6:20	7:43	17M	1
<b>1208</b>	6:35	7:58	6M	0.9764946
<b>1209</b>	6:55	8:18	13M	0.9756829
<b>1210</b>	7:15	8:39	22M	1
<b>1211</b>	7:35	8:59	1M	0.9995036
<b>1212</b>	7:55	9:19	19M	0.9972772
<b>1213</b>	8:15	9:39	5M	0.9972772
<b>1214</b>	8:30	9:54	8M	0.973429
<b>1215</b>	8:40	10:04	9M	0.973429
<b>1216</b>	8:55	10:19	3M	0.973429
<b>1217</b>	9:10	10:34	15M	0.9755219
<b>1218</b>	9:25	10:49	17M	0.9755219
<b>1219</b>	9:35	10:59	6M	0.9192937
<b>1220</b>	10:05	11:29	13M	0.9984334
<b>1221</b>	10:30	11:54	22M	0.9984334
<b>1222</b>	11:00	12:24	19M	0.9999923
<b>1223</b>	11:30	12:54	8M	0.9999923
<b>1224</b>	11:55	13:19	3M	0.9785943
<b>1225</b>	12:15	13:39	15M	0.9785943
<b>1226</b>	12:40	14:04	17M	0.9933642
<b>1227</b>	12:55	14:19	23M	0.9703455
<b>1228</b>	13:20	14:44	5M	0.9091527
<b>1229</b>	13:45	15:09	24M	0.9091527
<b>1230</b>	14:15	15:39	20M	0.9148654

**Tabela 6 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 1

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>1231</b>	14:45	16:09	27M	0.9148654
<b>1232</b>	15:10	16:34	30M	0.876636
<b>1233</b>	15:35	16:59	32M	0.876636
<b>1234</b>	15:55	17:19	35M	0.9022761
<b>1235</b>	16:15	17:39	38M	0.9022761
<b>1236</b>	16:35	17:59	40M	0.9094432
<b>1237</b>	16:50	18:14	24M	0.7437782
<b>1238</b>	17:15	18:39	41M	0.9757918
<b>1239</b>	17:30	18:54	46M	0.9124143
<b>1240</b>	17:40	19:04	27M	0.9124143
<b>1241</b>	18:10	19:34	30M	0.8958556
<b>1242</b>	18:20	19:44	36M	0.8958556
<b>1243</b>	18:35	19:59	32M	0.8958556
<b>1244</b>	18:55	20:19	23M	0.873885
<b>1245</b>	19:15	20:39	38M	0.873885
<b>1246</b>	19:35	20:59	40M	0.8595472
<b>1247</b>	19:50	21:14	24M	0.7525965
<b>1248</b>	20:15	21:39	29M	0.9985397
<b>1249</b>	20:35	21:59	46M	0.9985397
<b>1250</b>	20:40	22:04	27M	0.9891668
<b>1251</b>	21:15	22:39	41M	0.984173
<b>1252</b>	21:35	22:59	32M	0.9993315
<b>1253</b>	22:10	23:34	35M	0.9999532
<b>1254</b>	23:05	0:25	29M	0.860536
<b>1255</b>	0:10	1:20	36M	0.9543507

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Tabela 7 (continua)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2101</b>	5:15	6:07	4M	1
<b>2102</b>	5:40	6:31	6M	1
<b>2103</b>	6:00	7:00	1M	0.9994667
<b>2104</b>	6:15	7:15	2M	0.9994667
<b>2105</b>	6:30	7:30	3M	0.9994667
<b>2106</b>	6:45	7:45	5M	0.9543681
<b>2107</b>	7:00	8:00	7M	0.9543681
<b>2108</b>	7:15	8:15	4M	0.9939677
<b>2109</b>	7:25	8:25	8M	0.9834921
<b>2110</b>	7:35	8:35	9M	0.9834921
<b>2111</b>	7:45	8:45	6M	0.9834921
<b>2112</b>	7:50	8:50	10M	0.7907071
<b>2113</b>	7:55	8:55	12M	0.7907071
<b>2114</b>	8:05	9:05	1M	0.7907071
<b>2115</b>	8:20	9:20	2M	0.9106204
<b>2116</b>	8:35	9:35	3M	0.9106204
<b>2117</b>	8:50	9:50	5M	0.9106204
<b>2118</b>	9:05	10:05	7M	0.8735147
<b>2119</b>	9:20	10:20	4M	0.8735147
<b>2120</b>	9:30	10:30	8M	0.984825
<b>2121</b>	9:50	10:50	6M	0.8877457
<b>2122</b>	10:05	11:15	12M	0.9647456
<b>2123</b>	10:20	11:30	1M	0.9901647
<b>2124</b>	10:35	11:45	2M	0.9969936
<b>2125</b>	10:50	12:00	3M	0.9969936
<b>2126</b>	11:05	12:15	5M	0.9969936
<b>2127</b>	11:20	12:30	7M	0.9970595
<b>2128</b>	11:35	12:45	4M	0.9970595
<b>2129</b>	11:55	13:05	8M	0.9990317

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Tabela 7 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2130</b>	12:15	13:25	10M	1
<b>2131</b>	12:35	13:45	13M	1
<b>2132</b>	12:50	14:00	14M	1
<b>2133</b>	13:05	14:15	15M	1
<b>2134</b>	13:20	14:30	9M	1
<b>2135</b>	13:35	14:45	16M	1
<b>2136</b>	13:50	15:00	17M	1
<b>2137</b>	14:05	15:15	19M	1
<b>2138</b>	14:20	15:30	20M	1
<b>2139</b>	14:35	15:45	18M	1
<b>2140</b>	14:50	16:00	21M	1
<b>2141</b>	15:05	16:10	13M	0.9536449
<b>2142</b>	15:20	16:25	14M	0.9867742
<b>2143</b>	15:35	16:40	15M	0.9867742
<b>2144</b>	15:50	16:55	23M	1
<b>2145</b>	16:00	17:05	16M	0.9028471
<b>2146</b>	16:10	17:15	17M	0.6929738
<b>2147</b>	16:20	17:25	22M	1
<b>2148</b>	16:30	17:35	19M	0.9834103
<b>2149</b>	16:40	17:45	20M	0.9221315
<b>2150</b>	16:55	18:00	18M	0.9221315
<b>2151</b>	17:05	18:10	21M	0.8832161
<b>2152</b>	17:15	18:20	13M	0.8832161
<b>2153</b>	17:30	18:35	25M	1
<b>2154</b>	17:45	18:50	26M	1
<b>2155</b>	18:00	19:05	23M	0.6022583
<b>2156</b>	18:10	19:15	16M	0.8544017
<b>2157</b>	18:20	19:25	17M	0.8544017
<b>2158</b>	18:30	19:35	22M	0.8544017
<b>2159</b>	18:40	19:45	19M	0.8544017

**Tabela 7 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2160</b>	18:50	19:55	15M	1
<b>2161</b>	19:05	20:10	27M	1
<b>2162</b>	19:15	20:15	14M	1
<b>2163</b>	19:30	20:31	13M	0.9697164
<b>2164</b>	19:45	20:46	25M	0.9697164
<b>2165</b>	20:00	21:00	26M	0.9697164
<b>2166</b>	20:25	21:25	18M	1
<b>2167</b>	20:50	21:50	28M	1
<b>2168</b>	21:15	22:15	20M	1
<b>2169</b>	21:40	22:35	23M	1
<b>2170</b>	21:50	22:46	27M	0.9999998
<b>2171</b>	22:00	22:54	10M	1
<b>2172</b>	22:10	23:04	24M	1
<b>2173</b>	22:30	23:25	26M	0.9999085
<b>2174</b>	22:45	23:40	29M	1
<b>2175</b>	23:15	0:10	20M	0.9642122
<b>2176</b>	23:30	0:25	24M	1
<b>2177</b>	0:00	0:53	23M	0.9999382
<b>2201</b>	5:00	5:54	1M	1
<b>2202</b>	5:15	6:10	2M	1
<b>2203</b>	5:30	6:23	3M	1
<b>2204</b>	5:45	6:41	5M	1
<b>2205</b>	6:00	7:00	7M	1
<b>2206</b>	6:10	7:15	4M	1
<b>2207</b>	6:20	7:25	8M	1
<b>2208</b>	6:30	7:35	9M	1
<b>2209</b>	6:35	7:40	11M	1
<b>2210</b>	6:40	7:45	6M	0.9957717
<b>2211</b>	6:45	7:49	10M	1
<b>2212</b>	6:50	7:55	12M	1

**Tabela 7 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2213</b>	7:00	8:05	1M	0.9998893
<b>2214</b>	7:15	8:20	2M	0.9998893
<b>2215</b>	7:30	8:35	3M	0.9990487
<b>2216</b>	7:45	8:50	5M	0.9990487
<b>2217</b>	8:00	9:05	7M	0.9948583
<b>2218</b>	8:15	9:20	4M	0.9962375
<b>2219</b>	8:25	9:30	8M	0.9962375
<b>2220</b>	8:35	9:40	9M	0.9962375
<b>2221</b>	8:45	9:50	6M	0.9962375
<b>2222</b>	8:50	9:55	10M	0.9732709
<b>2223</b>	8:55	10:00	12M	0.9732709
<b>2224</b>	9:05	10:10	1M	0.9732709
<b>2225</b>	9:20	10:25	2M	0.9732709
<b>2226</b>	9:35	10:45	3M	0.9891769
<b>2227</b>	9:50	11:00	5M	0.9891769
<b>2228</b>	10:05	11:15	7M	0.9528988
<b>2229</b>	10:20	11:30	4M	0.9528988
<b>2230</b>	10:40	11:50	8M	0.999264
<b>2231</b>	11:00	12:10	6M	0.9960405
<b>2232</b>	11:20	12:30	12M	0.9994907
<b>2233</b>	11:35	12:45	1M	0.9994907
<b>2234</b>	11:50	13:00	2M	0.9995751
<b>2235</b>	12:05	13:15	3M	0.9995751
<b>2236</b>	12:20	13:30	5M	0.9995751
<b>2237</b>	12:35	13:45	7M	0.9999044
<b>2238</b>	12:50	14:00	4M	0.9999044
<b>2239</b>	13:10	14:20	8M	0.9995594
<b>2240</b>	13:30	14:40	10M	0.937196
<b>2241</b>	13:50	15:00	13M	0.998113
<b>2242</b>	14:05	15:15	14M	0.998113

**Tabela 7 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2243</b>	14:20	15:30	15M	0.9873793
<b>2244</b>	14:35	15:45	9M	0.9999788
<b>2245</b>	14:50	16:00	16M	0.9968489
<b>2246</b>	15:05	16:10	17M	0.9968489
<b>2247</b>	15:20	16:25	19M	0.9968489
<b>2248</b>	15:35	16:40	20M	0.9975589
<b>2249</b>	15:50	16:55	18M	0.9975589
<b>2250</b>	16:00	17:05	21M	0.9893788
<b>2251</b>	16:10	17:15	13M	0.9524915
<b>2252</b>	16:25	17:30	14M	0.9524915
<b>2253</b>	16:40	17:45	15M	0.850987
<b>2254</b>	16:55	18:00	23M	0.850987
<b>2255</b>	17:05	18:10	16M	0.9618127
<b>2256</b>	17:15	18:20	17M	0.9618127
<b>2257</b>	17:25	18:30	22M	0.9618127
<b>2258</b>	17:35	18:40	19M	0.9618127
<b>2259</b>	17:45	18:50	20M	0.9019727
<b>2260</b>	18:00	19:05	18M	0.6110673
<b>2261</b>	18:10	19:15	21M	0.9275712
<b>2262</b>	18:20	19:25	13M	0.9275712
<b>2263</b>	18:35	19:40	25M	0.6858499
<b>2264</b>	18:50	19:55	26M	0.6858499
<b>2265</b>	19:05	20:10	23M	0.6858499
<b>2266</b>	19:15	20:20	16M	0.9415369
<b>2267</b>	19:25	20:30	17M	0.9415369
<b>2268</b>	19:35	20:45	22M	0.943769
<b>2269</b>	19:50	21:00	19M	0.9880881
<b>2270</b>	20:00	21:05	15M	0.9880881
<b>2271</b>	20:15	21:15	27M	0.9976134
<b>2272</b>	20:25	21:35	14M	0.9976134

**Tabela 7 (continuação)** - Tabela de horários, blocos e confiabilidade das viagens na Linha 2.

<b>Código</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2273</b>	20:40	21:45	13M	0.9976134
<b>2274</b>	20:50	21:50	25M	0.9824961
<b>2275</b>	21:10	22:10	26M	0.9958644
<b>2276</b>	21:30	22:35	18M	0.9958674
<b>2277</b>	21:55	22:50	28M	0.9958674
<b>2278</b>	22:20	23:15	20M	0.9637687
<b>2279</b>	22:45	23:40	23M	0.9637687
<b>2280</b>	22:55	23:50	27M	0.9909262
<b>2281</b>	23:10	0:04	10M	0.9981309
<b>2282</b>	23:20	0:13	24M	0.9981309
<b>2283</b>	23:40	0:35	26M	0.9633885
<b>2284</b>	23:55	0:50	29M	0.9633885
<b>2285</b>	0:25	1:18	20M	0.9633885
<b>2286</b>	0:35	1:28	24M	0.9187554
<b>2287</b>	0:55	1:48	23M	0.6562354



## APÊNDICE C – Exemplo de Relatório de Operação

**Tabela 8 (continua)** – Relatório de operação do dia 03/08/2015, Linha 2-2.

<b>Veículo</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Saída Reg.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Chegada Reg.</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>13008</b>	5:00	5:03	5:54	5:47	44
<b>13009</b>	5:15	5:15	6:10	5:57	42
<b>13015</b>	5:30	5:30	6:23	0:00	0
<b>489</b>	5:45	7:12	6:41	0:00	0
<b>13014</b>	6:00	6:01	7:00	6:54	53
<b>13012</b>	6:10	8:15	7:15	7:06	56
<b>13011</b>	6:20	8:26	7:25	7:13	53
<b>13007</b>	6:30	6:37	7:35	7:27	50
<b>1019</b>	6:35	6:35	7:40	7:26	51
<b>13013</b>	6:40	8:45	7:45	7:39	59
<b>1013</b>	6:45	6:52	7:49	7:53	61
<b>150025</b>	6:50	0:00	7:55	0:00	0
<b>13008</b>	7:00	9:06	8:05	8:01	61
<b>13009</b>	7:15	7:20	8:20	8:16	56
<b>13015</b>	7:30	9:35	8:35	0:00	0
<b>467</b>	7:45	9:49	8:50	8:47	62
<b>13014</b>	8:00	10:07	9:05	8:51	51
<b>13012</b>	8:15	10:20	9:20	9:15	60
<b>13011</b>	8:25	0:00	9:30	9:19	0
<b>13007</b>	8:35	8:35	9:40	9:28	53
<b>13013</b>	8:45	0:00	9:50	9:42	0
<b>1013</b>	8:50	8:53	9:55	10:01	68
<b>150025</b>	8:55	8:58	10:00	10:00	62
<b>13008</b>	9:05	0:00	10:10	10:01	0
<b>13009</b>	9:20	9:21	10:25	10:19	58

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Tabela 8 (continuação) - Relatório de operação do dia 03/08/2015, Linha 2-2.**

<b>Veículo</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Saída Reg.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Chegada Reg.</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>13015</b>	9:35	0:00	10:45	10:34	0
<b>467</b>	9:50	0:00	11:00	10:42	0
<b>13014</b>	10:05	0:00	11:15	11:08	0
<b>13012</b>	10:20	0:00	11:30	11:21	0
<b>13011</b>	10:40	10:41	11:50	11:42	61
<b>13013</b>	11:00	11:01	12:10	12:01	60
<b>150025</b>	11:20	11:21	12:30	12:30	69
<b>13008</b>	11:35	11:35	12:45	12:42	67
<b>411</b>	11:50	11:50	13:00	12:58	68
<b>13015</b>	12:05	12:05	13:15	13:04	59
<b>467</b>	12:20	12:20	13:30	13:18	58
<b>13014</b>	12:35	12:36	13:45	13:45	69
<b>13012</b>	12:50	12:50	14:00	13:51	61
<b>13011</b>	13:10	13:13	14:20	14:21	68
<b>441</b>	13:30	13:29	14:40	14:48	79
<b>150025</b>	13:50	13:53	15:00	15:03	70
<b>13008</b>	14:05	14:06	15:15	15:07	61
<b>13013</b>	14:20	16:39	15:30	15:19	59
<b>411</b>	14:35	14:35	15:45	15:30	55
<b>467</b>	14:50	17:06	16:00	15:47	57
<b>13014</b>	15:05	15:07	16:10	16:12	65
<b>13012</b>	15:20	15:21	16:25	16:19	58
<b>13011</b>	15:35	15:38	16:40	16:35	57
<b>405</b>	15:50	15:52	16:55	16:52	60
<b>441</b>	16:00	16:02	17:05	16:51	49
<b>150025</b>	16:10	16:13	17:15	17:19	66
<b>13008</b>	16:25	16:25	17:30	17:23	58
<b>13013</b>	16:40	0:00	17:45	17:41	0

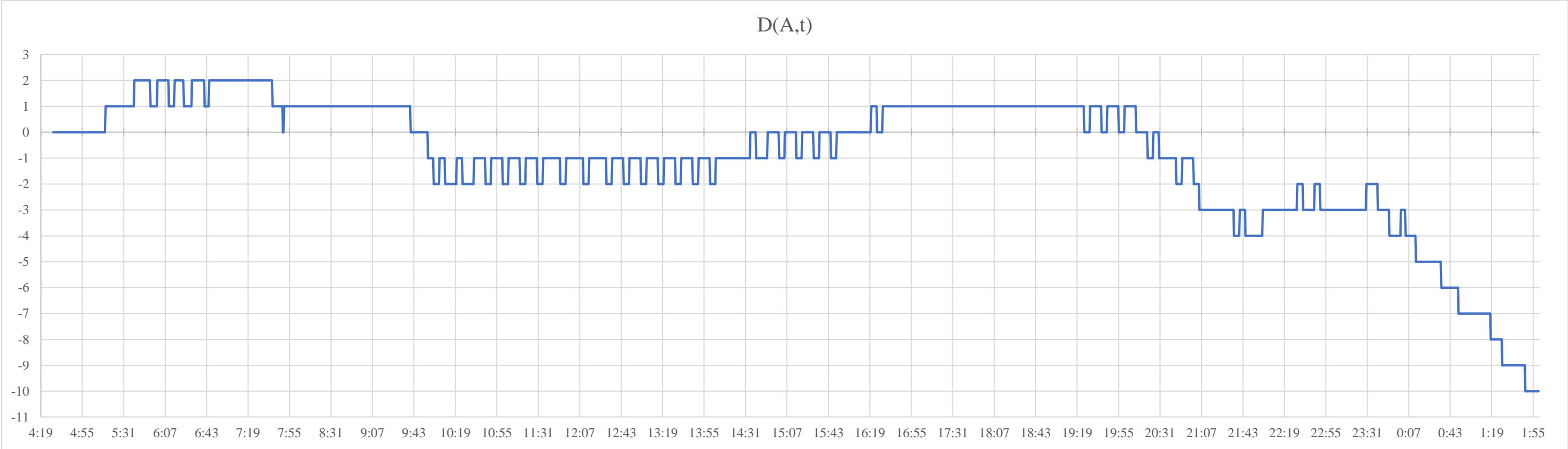
**Tabela 8 (continuação) - Relatório de operação do dia 03/08/2015, Linha 2-2.**

<b>Veículo</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Saída Reg.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Chegada Reg.</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>411</b>	16:55	16:56	18:00	18:21	85
<b>467</b>	17:05	0:00	18:10	18:15	0
<b>13014</b>	17:15	17:18	18:20	18:16	58
<b>13007</b>	17:25	17:26	18:30	18:36	70
<b>13012</b>	17:35	17:37	18:40	18:45	68
<b>13011</b>	17:45	0:00	18:50	0:00	0
<b>405</b>	18:00	18:06	19:05	19:24	78
<b>441</b>	18:10	18:15	19:15	19:26	71
<b>150025</b>	18:20	18:24	19:25	19:19	55
<b>13008</b>	18:35	18:37	19:40	19:32	55
<b>13013</b>	18:50	18:54	19:55	19:51	57
<b>150011</b>	19:05	19:26	20:10	20:18	52
<b>467</b>	19:15	19:18	20:20	20:10	52
<b>13014</b>	19:25	19:31	20:30	20:14	43
<b>13007</b>	19:35	19:36	20:45	20:20	44
<b>13012</b>	19:50	19:52	21:00	20:38	46
<b>13011</b>	20:00	20:00	21:05	20:50	50
<b>481</b>	20:25	20:29	21:35	21:15	46
<b>150025</b>	20:40	20:45	21:45	21:31	46
<b>13008</b>	20:50	20:50	21:50	21:35	45
<b>13013</b>	21:10	21:12	22:10	21:52	40
<b>467</b>	21:30	21:31	22:35	22:19	48
<b>13014</b>	21:55	21:56	22:50	22:40	44
<b>13011</b>	22:20	22:20	23:15	23:02	42
<b>150011</b>	22:45	0:00	23:40	0:00	0



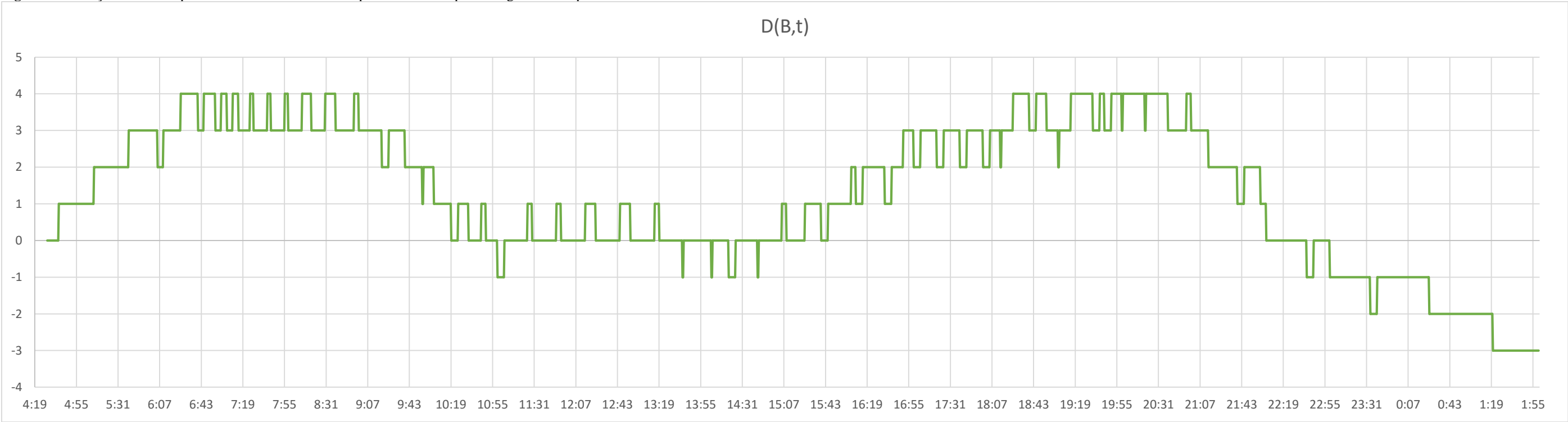
APÊNDICE D – Funções de Déficit (tempos estimados pela companhia)

Figura 15 – Função de Déficit para o terminal A utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia



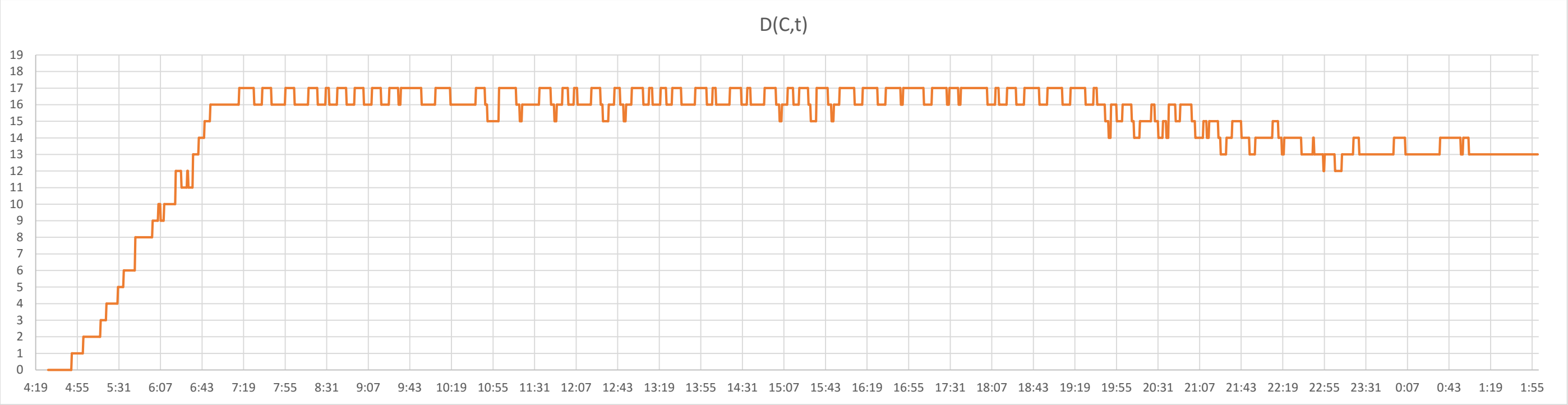
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 16 – Função de Déficit para o terminal B utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia



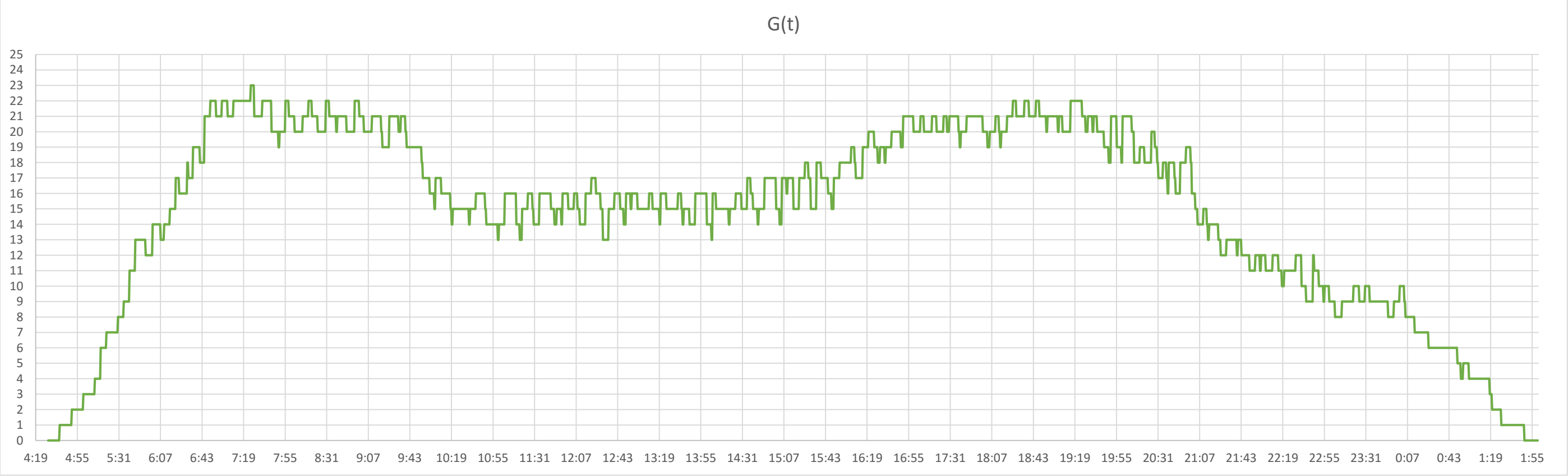
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 17 – Função de Déficit para o terminal C utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia



Fonte: desenvolvido pelo autor.

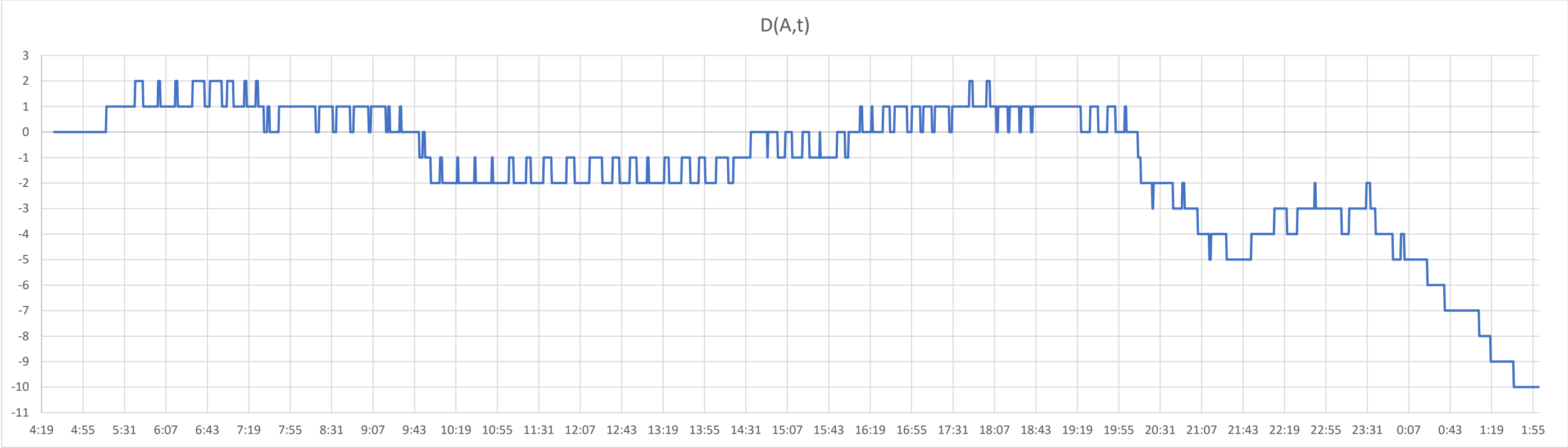
Figura 18 – Função de Déficit para o sistema (todos os terminais) utilizando as previsões de tempo de viagem da companhia



Fonte: desenvolvido pelo autor.

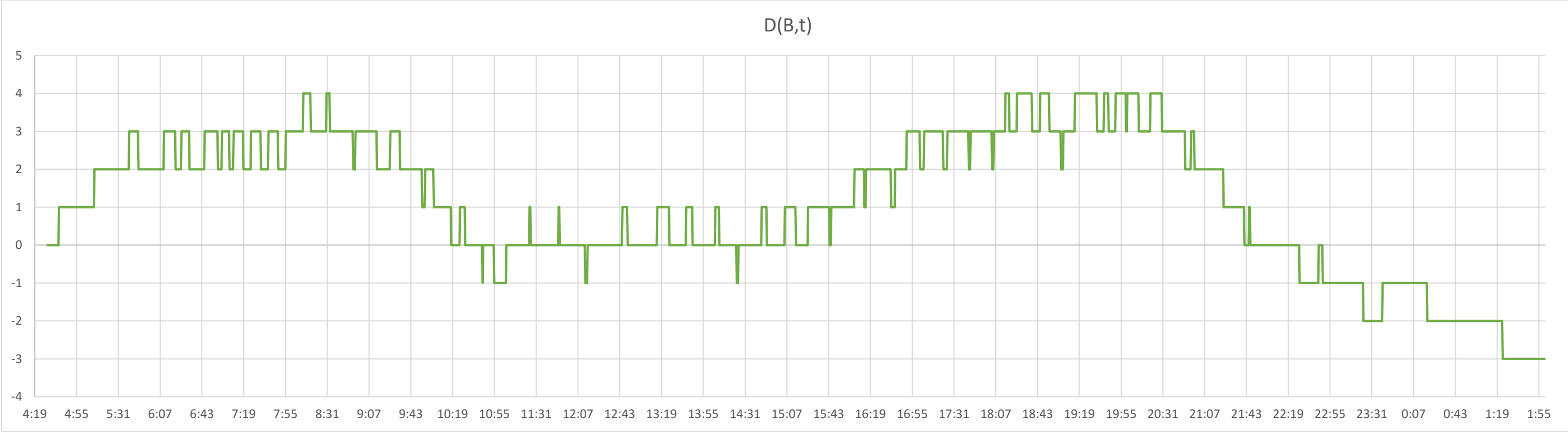
APÊNDICE E – Funções de Déficit (80º percentis dos tempos)

Figura 19 – Função de Déficit para o terminal A utilizando 80º percentis



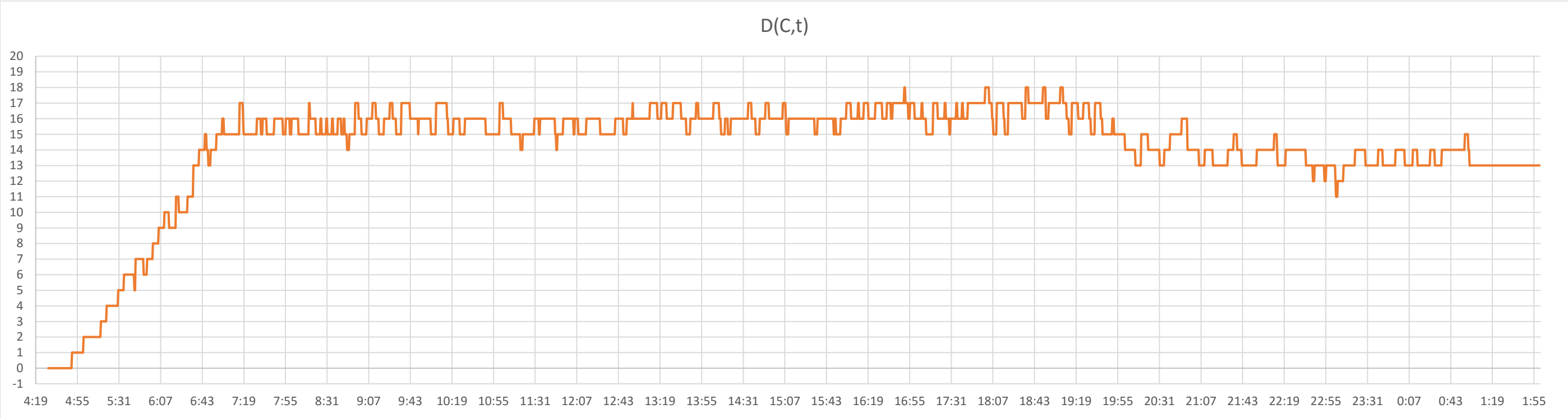
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 20 – Função de Déficit para o terminal B utilizando 80º percentis



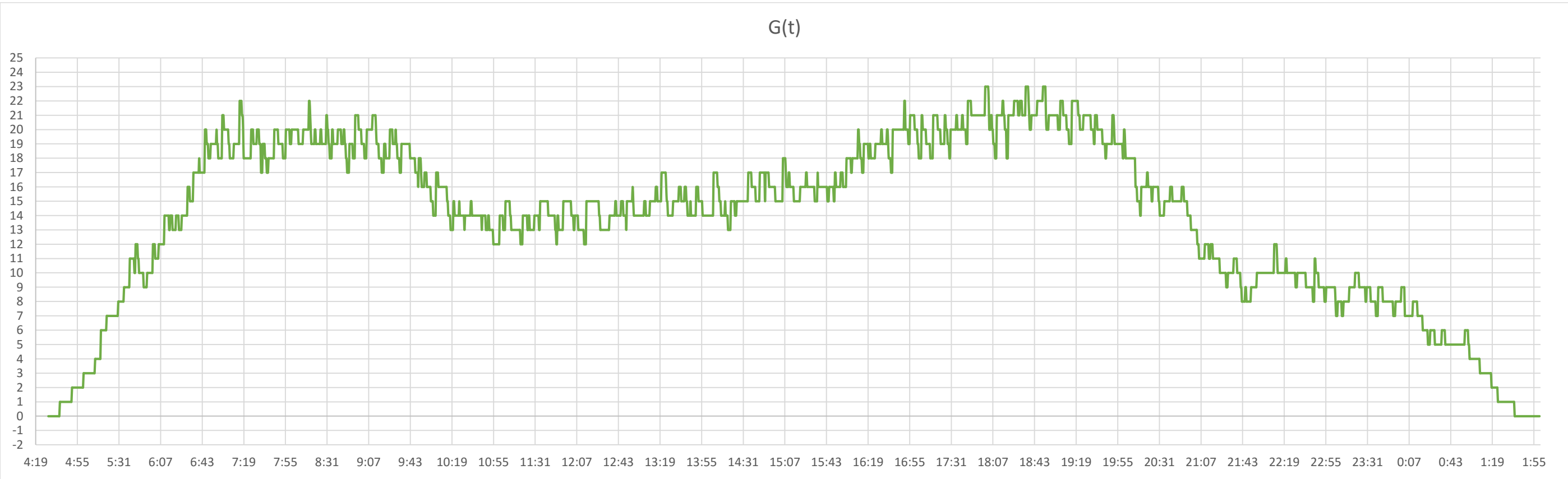
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 21 – Função de Déficit para o terminal C utilizando 80º percentis



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 22 – Função de Déficit para o sistema (todos os terminais) utilizando 80º percentis



Fonte: desenvolvido pelo autor.



## APÊNDICE F – Programação com 27 veículos

**Tabela 9 (continua)** – Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2101</b>	5:15	5:52	1209	A 1	1
<b>1209</b>	6:55	8:16	1114	A 1	1
<b>1114</b>	8:55	10:14	2230	A 1	1
<b>2230</b>	10:40	11:42	2133	A 1	0,999971994
<b>2133</b>	13:05	14:10	2244	A 1	1
<b>2244</b>	14:35	15:35	2147	A 1	0,999945131
<b>2147</b>	16:20	17:19	2258	A 1	1
<b>2258</b>	17:35	18:38	2161	A 1	0,998810223
<b>2161</b>	19:05	20:00	1249	A 1	0,999962581
<b>1249</b>	20:35	21:41	0	A 1	0,999997595
<b>2102</b>	5:40	6:22	2214	A 2	1
<b>2214</b>	7:15	8:17	2117	A 2	0,999990097
<b>2117</b>	8:50	9:42	1220	A 2	0,999999863
<b>1220</b>	10:05	11:26	1125	A 2	0,999996326
<b>1125</b>	13:40	15:07	2248	A 2	1
<b>2248</b>	15:35	16:36	2151	A 2	0,999979903
<b>2151</b>	17:05	18:06	2262	A 2	0,999990939
<b>2262</b>	18:20	19:22	2165	A 2	0,99732168
<b>2165</b>	20:00	20:55	2277	A 2	0,999997475
<b>2277</b>	21:55	22:46	0	A 2	0,999999992
<b>2103</b>	6:00	6:46	1210	A 3	1
<b>1210</b>	7:15	8:33	1115	A 3	0,999999992
<b>1115</b>	9:25	10:40	2232	A 3	1
<b>2232</b>	11:20	12:26	2135	A 3	1
<b>2135</b>	13:35	14:38	2246	A 3	1
<b>2246</b>	15:05	16:12	2149	A 3	0,999996636

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Tabela 9 (continuação) - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)**

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2149</b>	16:40	17:41	2261	A3	0,999985652
<b>2261</b>	18:10	19:15	2164	A3	0,999655678
<b>2164</b>	19:45	20:40	2276	A3	0,999857697
<b>2276</b>	21:30	22:21	0	A3	0,999999868
<b>1101</b>	4:40	5:44	2212	B1	1
<b>2212</b>	6:50	7:55	2115	B1	0,999296539
<b>2115</b>	8:20	9:13	2226	B1	0,99894512
<b>2226</b>	9:35	10:36	2129	B1	0,999846536
<b>2129</b>	11:55	12:55	2240	B1	1
<b>2240</b>	13:30	14:49	2143	B1	0,999999995
<b>2143</b>	15:35	16:38	2254	B1	0,999215923
<b>2254</b>	16:55	18:03	2157	B1	0,998900097
<b>2157</b>	18:20	19:20	1246	B1	0,999237731
<b>1246</b>	19:35	20:50	1151	B1	0,998555412
<b>1151</b>	22:45	0:03	0	B1	1
<b>1102</b>	5:10	6:14	2213	B2	1
<b>2213</b>	7:00	8:05	2116	B2	0,997127004
<b>2116</b>	8:35	9:27	2227	B2	0,999676086
<b>2227</b>	9:50	10:51	2130	B2	0,999996326
<b>2130</b>	12:15	13:24	2241	B2	1
<b>2241</b>	13:50	14:58	2144	B2	0,999761803
<b>2144</b>	15:50	16:53	2256	B2	0,999999992
<b>2256</b>	17:15	18:18	2159	B2	0,99984207
<b>2159</b>	18:40	19:40	2270	B2	0,999759771
<b>2270</b>	20:00	20:52	2173	B2	0,999643025
<b>2173</b>	22:30	23:29	2287	B2	1
<b>2287</b>	0:55	1:38	0	B2	0,999999551
<b>1103</b>	5:40	6:48	2215	B3	1

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2215</b>	7:30	8:32	2118	B3	0,999999985
<b>2118</b>	9:05	10:00	1221	B3	0,999999863
<b>1221</b>	10:30	11:51	1126	B3	0,999999376
<b>1126</b>	14:05	15:32	1234	B3	1
<b>1234</b>	15:55	17:21	1139	B3	0,99984712
<b>1139</b>	18:05	19:31	1247	B3	0,999999847
<b>1247</b>	19:50	20:58	1152	B3	0,979748971
<b>1152</b>	23:40	0:58	0	B3	1
<b>1104</b>	6:10	7:18	2216	B4	1
<b>2216</b>	7:45	8:47	2119	B4	0,999992326
<b>2119</b>	9:20	10:15	2231	B4	0,999999863
<b>2231</b>	11:00	12:02	2134	B4	1
<b>2134</b>	13:20	14:17	2245	B4	1
<b>2245</b>	14:50	15:57	2148	B4	0,999999999
<b>2148</b>	16:30	17:29	2259	B4	0,999998118
<b>2259</b>	17:45	18:50	2162	B4	0,998810223
<b>2162</b>	19:15	20:10	1250	B4	0,9994581
<b>1250</b>	20:40	21:46	0	B4	0,999986485
<b>1105</b>	6:25	7:38	2218	B5	1
<b>2218</b>	8:15	9:18	2121	B5	0,999994814
<b>2121</b>	9:50	10:48	1223	B5	0,999999954
<b>1223</b>	11:30	12:49	1128	B5	0,999999992
<b>1128</b>	14:45	16:11	1236	B5	1
<b>1236</b>	16:35	18:03	1141	B5	0,999434222
<b>1141</b>	18:25	19:51	2272	B5	0,998452563
<b>2272</b>	20:25	21:13	2175	B5	0,997479955
<b>2175</b>	23:15	0:14	0	B5	1
<b>1201</b>	4:50	5:48	1106	C1	1
<b>1106</b>	6:45	7:58	2219	C1	0,999999257

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2219</b>	8:25	9:22	2122	C1	0,999877534
<b>2122</b>	10:05	11:03	2233	C1	0,999999994
<b>2233</b>	11:35	12:41	2136	C1	0,999999296
<b>2136</b>	13:50	14:53	2247	C1	1
<b>2247</b>	15:20	16:21	2150	C1	0,999996636
<b>2150</b>	16:55	18:03	1241	C1	0,999998778
<b>1241</b>	18:10	19:34	1146	C1	0,957170857
<b>1146</b>	19:50	21:05	1253	C1	0,991472952
<b>1253</b>	22:10	23:23	0	C1	1
<b>2205</b>	6:00	6:55	2108	C10	1
<b>2108</b>	7:15	8:06	1214	C10	0,999940825
<b>1214</b>	8:30	9:52	1119	C10	0,99999943
<b>1119</b>	11:05	12:27	1227	C10	0,99999992
<b>1227</b>	12:55	14:23	1132	C10	0,999961233
<b>1132</b>	16:05	17:26	1240	C10	1
<b>1240</b>	17:40	19:03	1145	C10	0,994260902
<b>1145</b>	19:40	20:55	1252	C10	0,999996753
<b>1252</b>	21:35	22:48	0	C10	0,999999259
<b>1206</b>	6:05	7:18	1111	C11	1
<b>1111</b>	7:55	9:15	1219	C11	0,999999823
<b>1219</b>	9:35	10:54	1124	C11	0,998364513
<b>1124</b>	13:15	14:41	1232	C11	1
<b>1232</b>	15:10	16:36	1137	C11	0,999994186
<b>1137</b>	17:25	18:52	2265	C11	0,999999977
<b>2265</b>	19:05	20:01	2168	C11	0,987477464
<b>2168</b>	21:15	22:12	2281	C11	0,999999997
<b>2281</b>	23:10	23:53	0	C11	0,999999979
<b>2206</b>	6:10	7:05	2109	C12	1
<b>2109</b>	7:25	8:16	2220	C12	0,999940825

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2220</b>	8:35	9:32	2123	C12	0,999988253
<b>2123</b>	10:20	11:18	1224	C12	0,999999999
<b>1224</b>	11:55	13:25	1129	C12	0,999999925
<b>1129</b>	15:05	16:31	1237	C12	1
<b>1237</b>	16:50	18:18	1142	C12	0,99869726
<b>1142</b>	18:45	20:01	2273	C12	0,999607249
<b>2273</b>	20:40	21:28	2176	C12	0,999999985
<b>2176</b>	23:30	0:29	0	C12	1
<b>2207</b>	6:20	7:17	2110	C13	1
<b>2110</b>	7:35	8:26	2221	C13	0,999657693
<b>2221</b>	8:45	9:47	2124	C13	0,999988253
<b>2124</b>	10:35	11:34	2235	C13	0,999999501
<b>2235</b>	12:05	13:06	2138	C13	0,999999735
<b>2138</b>	14:20	15:20	2249	C13	1
<b>2249</b>	15:50	16:51	2152	C13	0,999990175
<b>2152</b>	17:15	18:16	2263	C13	0,999934345
<b>2263</b>	18:35	19:37	2166	C13	0,999582647
<b>2166</b>	20:25	21:17	2279	C13	0,999999902
<b>2279</b>	22:45	23:33	0	C13	1
<b>1207</b>	6:20	7:33	1112	C14	1
<b>1112</b>	8:10	9:30	2228	C14	0,999999823
<b>2228</b>	10:05	11:09	2131	C14	0,999980545
<b>2131</b>	12:35	13:37	2242	C14	1
<b>2242</b>	14:05	15:11	2145	C14	0,999998606
<b>2145</b>	16:00	16:59	1238	C14	1
<b>1238</b>	17:15	18:38	1143	C14	0,998810223
<b>1143</b>	19:05	20:21	2274	C14	0,999902675
<b>2274</b>	20:50	21:40	2177	C14	0,999998286
<b>2177</b>	0:00	0:59	0	C14	1

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_t</math></b>
<b>2208</b>	6:30	7:27	2111	C15	1
<b>2111</b>	7:45	8:36	2223	C15	0,999657693
<b>2223</b>	8:55	9:57	2126	C15	0,999988253
<b>2126</b>	11:05	12:04	2237	C15	0,999999998
<b>2237</b>	12:35	13:42	2140	C15	0,999999735
<b>2140</b>	14:50	15:49	2251	C15	1
<b>2251</b>	16:10	17:12	2154	C15	0,999615003
<b>2154</b>	17:45	18:52	2266	C15	0,999989087
<b>2266</b>	19:15	20:11	2169	C15	0,999301414
<b>2169</b>	21:40	22:37	2283	C15	1
<b>2283</b>	23:40	0:23	0	C15	0,999999995
<b>2209</b>	6:35	7:32	2112	C16	1
<b>2112</b>	7:50	8:43	1216	C16	0,999657693
<b>1216</b>	8:55	10:17	1121	C16	0,994903542
<b>1121</b>	11:50	13:16	1229	C16	0,999999998
<b>1229</b>	13:45	15:14	1134	C16	0,999994597
<b>1134</b>	16:40	18:07	1242	C16	1
<b>1242</b>	18:20	19:44	1147	C16	0,993931084
<b>1147</b>	20:00	21:15	2278	C16	0,991472952
<b>2278</b>	22:20	23:08	0	C16	1
<b>1208</b>	6:35	7:48	1113	C17	1
<b>1113</b>	8:30	9:49	2229	C17	0,999999979
<b>2229</b>	10:20	11:24	2132	C17	0,999996632
<b>2132</b>	12:50	13:52	2243	C17	1
<b>2243</b>	14:20	15:26	2146	C17	0,999998606
<b>2146</b>	16:10	17:09	1239	C17	0,999999996
<b>1239</b>	17:30	18:53	1144	C17	0,999820869
<b>1144</b>	19:15	20:31	1251	C17	0,999495828
<b>1251</b>	21:15	22:28	0	C17	0,999999999

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>2210</b>	6:40	7:37	2113	C18	1
<b>2113</b>	7:55	8:48	1217	C18	0,999657693
<b>1217</b>	9:10	10:29	1122	C18	0,999846536
<b>1122</b>	12:15	13:41	1230	C18	1
<b>1230</b>	14:15	15:43	1135	C18	0,999999472
<b>1135</b>	16:50	18:17	1243	C18	0,999999992
<b>1243</b>	18:35	19:59	1148	C18	0,998861453
<b>1148</b>	20:20	21:38	2280	C18	0,997297741
<b>2280</b>	22:55	23:38	0	C18	1
<b>2211</b>	6:45	7:50	2114	C19	1
<b>2114</b>	8:05	8:58	2225	C19	0,989500858
<b>2225</b>	9:20	10:21	2128	C19	0,999846536
<b>2128</b>	11:35	12:35	2239	C19	1
<b>2239</b>	13:10	14:15	2142	C19	1
<b>2142</b>	15:20	16:19	2253	C19	1
<b>2253</b>	16:40	17:48	2156	C19	0,999615003
<b>2156</b>	18:10	19:10	2267	C19	0,999904383
<b>2267</b>	19:25	20:14	2170	C19	0,998555412
<b>2170</b>	21:50	22:43	2284	C19	1
<b>2284</b>	23:55	0:38	0	C19	1
<b>2201</b>	5:00	5:47	2104	C2	1
<b>2104</b>	6:15	7:01	1211	C2	0,999999754
<b>1211</b>	7:35	8:53	1116	C2	1
<b>1116</b>	9:55	11:10	2234	C2	1
<b>2234</b>	11:50	12:56	2137	C2	1
<b>2137</b>	14:05	15:08	1233	C2	1
<b>1233</b>	15:35	17:01	1138	C2	0,999996636
<b>1138</b>	17:45	19:12	2268	C2	0,999999847
<b>2268</b>	19:35	20:24	2171	C2	0,999200097

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_t</math></b>
<b>2171</b>	22:00	22:53	1255	C2	1
<b>1255</b>	0:10	1:23	0	C2	1
<b>2202</b>	5:15	6:02	2105	C3	1
<b>2105</b>	6:30	7:18	1212	C3	0,999999754
<b>1212</b>	7:55	9:13	1117	C3	0,999999999
<b>1117</b>	10:25	11:48	1225	C3	1
<b>1225</b>	12:15	13:45	1130	C3	0,999998414
<b>1130</b>	15:25	16:51	2255	C3	1
<b>2255</b>	17:05	18:08	2158	C3	0,993855167
<b>2158</b>	18:30	19:30	2269	C3	0,999759771
<b>2269</b>	19:50	20:42	2172	C3	0,999643025
<b>2172</b>	22:10	23:03	2286	C3	1
<b>2286</b>	0:35	1:18	0	C3	1
<b>1202</b>	5:20	6:20	1107	C4	1
<b>1107</b>	7:00	8:21	1215	C4	0,999971976
<b>1215</b>	8:40	10:02	1120	C4	0,998255002
<b>1120</b>	11:25	12:47	1228	C4	0,999999989
<b>1228</b>	13:20	14:49	1133	C4	0,999993782
<b>1133</b>	16:15	17:36	2260	C4	1
<b>2260</b>	18:00	19:05	2163	C4	0,999757839
<b>2163</b>	19:30	20:25	2275	C4	0,9994581
<b>2275</b>	21:10	22:00	0	C4	0,999999919
<b>2203</b>	5:30	6:17	2106	C5	1
<b>2106</b>	6:45	7:33	2217	C5	0,999999754
<b>2217</b>	8:00	9:03	2120	C5	0,999999791
<b>2120</b>	9:30	10:25	1222	C5	0,999999202
<b>1222</b>	11:00	12:13	1127	C5	0,999999943
<b>1127</b>	14:25	15:51	1235	C5	1
<b>1235</b>	16:15	17:43	1140	C5	0,999434222



**Tabela 9 (continuação) - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)**

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_i</math></b>
<b>1140</b>	18:15	19:41	2271	C5	0,99990439
<b>2271</b>	20:15	21:03	2174	C5	0,997479955
<b>2174</b>	22:45	23:44	0	C5	1
<b>1203</b>	5:35	6:32	1108	C6	1
<b>1108</b>	7:10	8:31	2222	C6	0,999737427
<b>2222</b>	8:50	9:52	2125	C6	0,998255002
<b>2125</b>	10:50	11:49	2236	C6	0,99999997
<b>2236</b>	12:20	13:24	2139	C6	0,999999735
<b>2139</b>	14:35	15:35	2250	C6	1
<b>2250</b>	16:00	17:02	2153	C6	0,999935673
<b>2153</b>	17:30	18:37	1244	C6	0,999941046
<b>1244</b>	18:55	20:10	1149	C6	0,997088394
<b>1149</b>	20:55	22:13	2282	C6	0,999985862
<b>2282</b>	23:20	0:03	0	C6	0,999999998
<b>2204</b>	5:45	6:40	2107	C7	1
<b>2107</b>	7:00	7:52	1213	C7	0,999940825
<b>1213</b>	8:15	9:33	1118	C7	0,999999792
<b>1118</b>	10:45	12:08	1226	C7	1
<b>1226</b>	12:40	14:08	1131	C7	0,999999896
<b>1131</b>	15:45	17:06	2257	C7	1
<b>2257</b>	17:25	18:28	2160	C7	0,998777342
<b>2160</b>	18:50	19:50	1248	C7	0,999759771
<b>1248</b>	20:15	21:23	0	C7	0,999944305
<b>1204</b>	5:45	6:56	1109	C8	1
<b>1109</b>	7:25	8:46	2224	C8	0,999501531
<b>2224</b>	9:05	10:07	2127	C8	0,998255002
<b>2127</b>	11:20	12:20	2238	C8	0,999999999
<b>2238</b>	12:50	13:55	2141	C8	0,999999997
<b>2141</b>	15:05	16:04	2252	C8	1

**Tabela 9 (continuação)** - Programação com frota de 27 veículos (97,88% de confiabilidade)

<b>Cod.</b>	<b>Saída Prog.</b>	<b>Chegada Prev.</b>	<b>Próxima viagem</b>	<b>Bloco</b>	<b><math>r_t</math></b>
<b>2252</b>	16:25	17:27	2155	C8	0,999615003
<b>2155</b>	18:00	19:07	1245	C8	0,999989087
<b>1245</b>	19:15	20:30	1150	C8	0,959786539
<b>1150</b>	21:45	23:03	2285	C8	0,999999972
<b>2285</b>	0:25	1:08	0	C8	1
<b>1205</b>	5:55	7:06	1110	C9	1
<b>1110</b>	7:40	9:00	1218	C9	0,9998341
<b>1218</b>	9:25	10:44	1123	C9	0,999615444
<b>1123</b>	12:45	14:11	1231	C9	1
<b>1231</b>	14:45	16:13	1136	C9	0,999999404
<b>1136</b>	17:05	18:32	2264	C9	0,999999477
<b>2264</b>	18:50	19:52	2167	C9	0,998861453
<b>2167</b>	20:50	21:42	1254	C9	0,999999996
<b>1254</b>	23:05	0:18	0	C9	1